

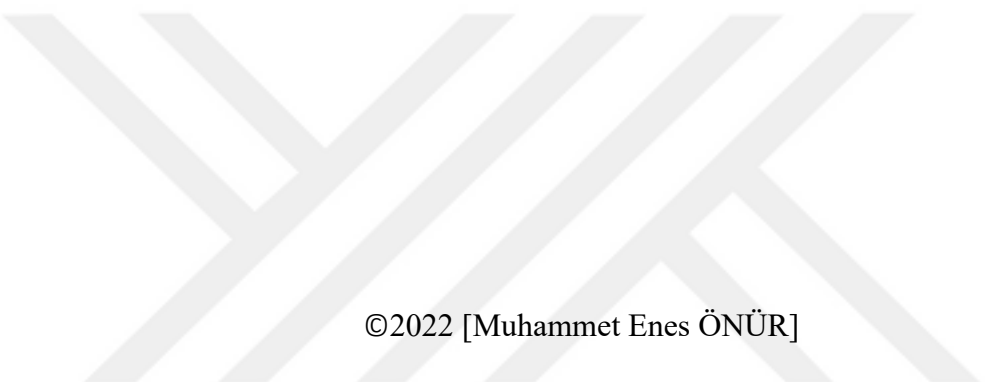
**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİ ÇEŞİT BİYOKÜTLE KULLANILARAK HAZIRLANAN  
PELETLERİN YAKIT KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Muhammet Enes ÖNÜR**

**Danışman  
Doç. Dr. Sema YURDAKUL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA- 2022**



©2022 [Muhammet Enes ÖNÜR]

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                                                                | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| İÇİNDEKİLER .....                                                                                                                                                              | i     |
| ÖZET.....                                                                                                                                                                      | ii    |
| ABSTRACT.....                                                                                                                                                                  | iii   |
| TEŞEKKÜR.....                                                                                                                                                                  | iv    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                                                                                                           | v     |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                                                                                                                        | vi    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                                                                                                           | vii   |
| 1. GİRİŞ .....                                                                                                                                                                 | 1     |
| 1.1. Çalışmanın Amacı.....                                                                                                                                                     | 4     |
| 1.2. Çalışmanın Kapsamı .....                                                                                                                                                  | 4     |
| 1.3. Biyokütle Nedir.....                                                                                                                                                      | 5     |
| 1.3.1. Biyokütle enerjisi .....                                                                                                                                                | 5     |
| 1.3.2. Biyokütle enerjisinin kaynakları .....                                                                                                                                  | 6     |
| 1.3.3. Biyokütle enerjisi elde etme yöntemleri .....                                                                                                                           | 6     |
| 1.4. Pelet Nedir.....                                                                                                                                                          | 8     |
| 1.4.1. Pelet nerelerde kullanılır .....                                                                                                                                        | 8     |
| 1.4.2. Pelet yakıtının özellikleri .....                                                                                                                                       | 8     |
| 1.5. Torefikasyon Nedir .....                                                                                                                                                  | 9     |
| 2. LİTERATÜR TARAMASI.....                                                                                                                                                     | 12    |
| 3. MATERYAL VE METOD .....                                                                                                                                                     | 15    |
| 3.1. Elek analizi.....                                                                                                                                                         | 18    |
| 3.2. Optimum Torefikasyon Süresi ve Sıcaklığının Belirlenmesi için<br>Gerçekleştirilen Ön Deneyler .....                                                                       | 19    |
| 3.3. Peletlerdeki Optimum Nem ve Bağlayıcı Oranın Belirlenmesi.....                                                                                                            | 20    |
| 3.4. Karışımın Hazırlanması .....                                                                                                                                              | 21    |
| 3.5. Torefiye Peletlerin Kütle ve Enerji Veriminin Hesaplanması .....                                                                                                          | 23    |
| 3.6. Peletlerin Hazırlanması .....                                                                                                                                             | 24    |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                                                                                                                                  | 28    |
| 4.1. Farklı Nem ve Bağlayıcı Oranı Kullanılarak Hazırlanan Ham Çam ve<br>Ham Gül Peletlerinin Yakıt Özelliklerinin İncelenmesi.....                                            | 28    |
| 4.2. Farklı Nem ve Bağlayıcı Oranı Kullanılarak Hazırlanan Ham<br>Çam ve Gül Peletlerinin Torefiye Edilmesiyle Elde Edilen<br>Peletlerin Yakıt Özelliklerinin İncelenmesi..... | 31    |
| 4.3. Deneylerde Elde Edilen Ham ve Torefiye Haldeki Çam ve<br>Gül Peletlerinin Yaklaşık Analiz Sonuçları.....                                                                  | 35    |
| 4.4. Deneylerde Elde Edilen Torefiye Gül ve Çam Peletlerinin<br>Kütle Verimleri, Enerji Verimleri ve Enerji Yoğunluk Oranları.....                                             | 39    |
| 4.5. Deneylerde Elde Edilen Torefiye Gül ve Torefiye Çam Peletlerinin<br>Kırılma Direncinin İncelenmesi .....                                                                  | 43    |
| 4.6. Hazırlanan Peletlerin Nem Alma Direnci .....                                                                                                                              | 46    |
| 4.7. Deneyler İçin Hazırlanan Peletlerin Depolama Davranışının<br>İncelenmesi .....                                                                                            | 50    |
| 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....                                                                                                                                                   | 52    |
| KAYNAKÇA.....                                                                                                                                                                  | 56    |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                                                                                 | 63    |

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### İKİ ÇEŞİT BİYOKÜTLE KULLANILARAK HAZIRLANAN PELETLERİN YAKIT KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammet Enes ÖNÜR

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sema YURDAKUL

Bu çalışmada, iki çeşit biyokütle; gül posası ve çam talaşı farklı nem ve katkı oranları kullanılarak peletlenmiştir. Daha sonra hazırlanan peletler 270°C’de ve 1 saat süreyle torefiye edilmiştir. Hazırlanan ham ve torefiye peletlerin çeşitli yakıt özellikleri; kütle, çap, uzunluk, yaklaşık analizleri yapılmış, üst ısı değerleri, kırılma dirençleri ve nem alma dirençleri çalışma kapsamında incelenmiştir. Çalışma sonucunda, hazırlanan ham ve torefiye peletlerin, torefiye gül peletlerin çap değerleri hariç, standartta verilen çap, uzunluk ve parça yoğunluğu değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, hem ham hem de torefiye çam ve gül peletlerinde nem oranı arttıkça peletlerin dayanımı azalmıştır. Bununla birlikte, ham peletlerde olduğu gibi artan nişasta oranı ile birlikte torefiye peletlerin gerilme mukavemetleri de bir artış göstermiştir. Genel olarak torefiye olan peletlerin kül içerikleri, sabit karbon içerikleri ve üst ısı değerleri ham hallerine kıyasla artış göstermiştir. Bununla beraber genel olarak nem ve uçucu madde içerikleri ise azalış göstermiştir. Torefikasyon sonucunda, peletlerin sabit karbon içeriğindeki artışa paralel olarak ham çam peletlerinin kalorifik değeri torefikasyon ile 17,51-18,80 MJ/kg’dan 20,20-21,73 MJ/kg’a, ham gül peletlerinin kalorifik değeri de 17,42-18,54 MJ/kg’dan 19,13-20,92 MJ/kg’a yükselmiştir. Çalışmada torefiye çam ve gül peletleri için nem oranı ile enerji verimi, enerji yoğunluğu ve kütle verimi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir değişim bulunamamıştır. Buna karşın enerji yoğunluk oranları genel olarak artan nişasta içeriğiyle birlikte hem torefiye gül hem de torefiye çam peletlerinde bir artış göstermiştir. Aynı nem oranlarında ham çam peletleri 2,4 - 6 kat arasında değişen oranlarda ham gül peletlerine kıyasla daha fazla kırılmaya ve ufalanmaya yatkın bulunmuştur. Torefikasyon işlemi peletlerin kırılma ve ufalanma miktarlarını arttırmıştır. Ancak, torefiye olan peletler ayrıca nem alma konusunda ham peletlere kıyasla daha kararlı bulunmuştur. Hem ham hem de torefiye gül peletlerinin çam peletlerine kıyasla nem alma dirençlerinin daha yüksek olduğu ve torefikasyon işleminin biyopeletlerin nem alma direncini arttırdığı dolayısıyla hidrofilik yapıyı hidrofobik yaptığı görülmüştür. Torefiye edilmiş çam ve gül peletlerinin su alımına ve daha fazla parçalanmaya karşı direndiği ve ham peletlere kıyasla açık havada daha uzun süre depolanabileceği açık olarak çalışmamızda görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Biyokütle, Biyo-pelet, Gül posası, Çam talaşı, Yakıt karakteristiği

2022, 63 Sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF FUEL CHARACTERISTICS OF PELLETS MADE FROM TWO TYPES OF BIOMASSES**

**Muhammet Enes ÖNÜR**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Environmental Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Sema YURDAKUL**

In this study, two types of biomasses; rose pulp and pine sawdust were pelleted by using different moisture and additive ratios. Afterwards, the prepared pellets were torrefied at 270°C for 1 hour. Various fuel properties of prepared raw and torrefied pellets; mass, diameter, length, approximate analyses were made, and higher heating values, breakage values and water uptake resistances were examined within the scope of the study. As a result of the study, it was seen that the prepared raw and torrefied pellets were compatible with the diameter, length and particle density values given in the standard, except for the diameter values of the torrefied rose pellets. In addition, the strength of the pellets decreased as the moisture content increased in both raw and torrefied pine and rose pellets. However, as in the raw pellets, the tensile strength of the torrefied pellets increased with the increasing starch ratio. In general, the ash contents, fixed carbon contents and higher heating values of the torrefied pellets increased compared to their raw form. However, in general, moisture and volatile matter contents decreased. As a result of torrefaction, in parallel with the increase in the fixed carbon content of the pellets, the calorific value of raw pine pellets increased from 17.51-18.80 MJ/kg to 20.20-21.73 MJ/kg by torrefaction, and the calorific value of raw rose pellets was increased from 42-18.54 MJ/kg to 19.13-20.92 MJ/kg. In the study, no statistically significant difference was found between moisture content and energy efficiency, energy density and mass yield for torrefied pine and rose pellets. On the other hand, energy density ratios generally showed an increase with increasing starch content in both rose and pine pellets. At the same humidity, raw pine pellets were found to be more resistant to breakage and chipping than raw rose pellets at rates ranging from 2.4 to 6 times. The torrefication process increased the amount of breakage and crumbling of the pellets. However, torrefied pellets were also found to be more stable in water uptake than raw pellets. It has been observed that both raw and torrefied rose pellets have higher moisture absorption resistance compared to pine pellets, and the torrefication process has increased the moisture resistance of the biopellets, thus making the hydrophilic structure hydrophobic. In this study, it has been clearly seen that the torrefied both pine and rose pellets resist water uptake and further degradation. Accordingly, they can be stored in the open air longer than the raw pellets.

**Keywords:** Biomass, Bio-pelet, Rose pulp, Pine sawdust, Fuel characteristic

**2022, 63 Pages**

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada benden yardımlarını esirgemeyen Danışmanım Doç. Dr. Sema Yurdakul'a ve değerli juri üyelerim Prof. Dr. Muhammet Yunus Pamukoğlu ve Doç. Dr. Mihriban Civana'a teşekkür ederim.

Tezimin hazırlanmasına olan katkılarından dolayı Doç. Dr. Barış Gürel, Dr. Karani Kurtuluş, Kudret Benek, Remzi Akman, Erkut Akşit, Büşra Çetinkaya, Sena Erkent'e ve Gürkan Gül Yağı Fabrikası'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin gerçekleşmesinde 118Y247 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bana olan sonsuz desteklerinden dolayı aileme de teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Muhammet Enes ÖNÜR  
ISPARTA, 2022

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                           | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1. Oda sıcaklığında ve sonrasında etüvde kurutulan malzemeler .....                                               | 15    |
| Şekil 3.2. Ham gül posası.....                                                                                            | 16    |
| Şekil 3.3. Bilyalı Değirmen.....                                                                                          | 17    |
| Şekil 3.4. 2 mm ile 250 µm arasında elenen gül posası .....                                                               | 17    |
| Şekil 3.5. Kilitli poşetlerde muhafaza edilen gül ve kızılçam talaşı .....                                                | 17    |
| Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan 3 kw'lık pelet makinası .....                                                             | 19    |
| Şekil 3.7. Torefikasyon için hazırlanan gül posası ve kızılçam talaşı .....                                               | 19    |
| Şekil 3.8. %50 - %55 - %60 nem oranlarında torefiye edilen çam peletleri.....                                             | 20    |
| Şekil 3.9. %50, %55 ve %60 nem oranlarında torefiye edilen gül peletleri .....                                            | 20    |
| Şekil 3.10. %45 nem + %0 nişasta ile % 50 nem ve farklı bağlayıcı oranları<br>kullanılarak hazırlanan çam peletleri ..... | 24    |
| Şekil 3.11. % 55 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan<br>çam peletleri.....                           | 25    |
| Şekil 3.12. % 60 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan<br>çam peletleri.....                           | 25    |
| Şekil 3.13. % 50 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan<br>gül peletleri .....                          | 26    |
| Şekil 3.14. % 55 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan<br>gül peletleri .....                          | 26    |
| Şekil 3.15. % 60 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan<br>gül peletleri .....                          | 27    |
| Şekil 4.1. Farklı nem ve bağlayıcı kullanılarak hazırlanmış ham gül posası<br>peletlerinin nem alma direnci .....         | 48    |
| Şekil 4.2. Farklı nem ve bağlayıcı kullanılarak hazırlanmış ham çam<br>peletlerinin nem alma direnci .....                | 48    |
| Şekil 4.3. Farklı nem ve bağlayıcı kullanılarak hazırlanmış torefiye<br>çam peletlerinin nem alma direnci .....           | 49    |
| Şekil 4.4. Farklı nem ve bağlayıcı kullanılarak hazırlanmış torefiye<br>gül posası peletlerinin nem alma direnci .....    | 49    |
| Şekil 4.5. Çalışma sırasında üretilmiş ve 4 yıl boyunca kilitli poşetlerde<br>saklanmış olan çam ve gül peletleri .....   | 51    |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 1.1. Ham biyokütlenin biyopelet ve torefiye biyopelet ile özellikleri açısından karşılaştırması .....                                                                       | 11 |
| Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan malzemelerin elementel ve yaklaşık analizleri .....                                                                                               | 16 |
| Çizelge 3.2. Elek analizi kayıp ve hataları .....                                                                                                                                   | 18 |
| Çizelge 3.3. %50 nem oranında gül posası peletleri .....                                                                                                                            | 21 |
| Çizelge 3.4. %55 nem oranında gül posası peletleri .....                                                                                                                            | 22 |
| Çizelge 3.5. %60 nem oranında gül posası peletleri .....                                                                                                                            | 22 |
| Çizelge 3.6. %50 nem oranında çam talaşı peletleri .....                                                                                                                            | 22 |
| Çizelge 3.7. %55 nem oranında çam talaşı peletleri .....                                                                                                                            | 23 |
| Çizelge 3.8. %60 nem oranında çam talaşı peletleri .....                                                                                                                            | 23 |
| Çizelge 4.1. Deneylerde hazırlanan ham çam kütle, çap, uzunluk, parça ve yığın yoğunluğu ölçüm sonuçları (Sonuçlar ortalama±standart sapma şeklinde verilmiştir).....               | 29 |
| Çizelge 4.2. Deneylerde hazırlanan ham gül peletlerinin kütle, çap, uzunluk, parça ve yığın yoğunluğu ölçüm sonuçları (Sonuçlar ortalama±standart sapma şeklinde verilmiştir) ..... | 30 |
| Çizelge 4.3. Deneylerde hazırlanan ham çam peletlerinin gerilme mukavemet sonuçları.....                                                                                            | 31 |
| Çizelge 4.4. Deneylerde hazırlanan ham gül peletlerinin gerilim mukavemet sonuçları.....                                                                                            | 31 |
| Çizelge 4.5. Deneylerde torefiye edilmiş çam peletlerinin kütle, çap, uzunluk, yığın ve parça yoğunluğu ölçüm sonuçları .....                                                       | 33 |
| Çizelge 4.6. Deneylerde torefiye edilmiş gül peletlerinin kütle, çap, uzunluk, yığın ve parça yoğunluğu ölçüm sonuçları .....                                                       | 34 |
| Çizelge 4.7. Torefiye edilen çam peletlerinin gerilme mukavemeti sonuçları .....                                                                                                    | 35 |
| Çizelge 4.8. Torefiye edilen gül peletlerinin gerilme mukavemeti sonuçları .....                                                                                                    | 35 |
| Çizelge 4.9. Deneylerde hazırlanan torefiye çam peletlerinin yaklaşık analiz sonuçları.....                                                                                         | 38 |
| Çizelge 4.10. Deneylerde hazırlanan torefiye gül peletlerinin yaklaşık analiz sonuçları.....                                                                                        | 38 |
| Çizelge 4.11. Deneylerde hazırlanan ham çam peletlerinin yaklaşık analiz sonuçları.....                                                                                             | 39 |
| Çizelge 4.12. Deneylerde kullanılan ham gül peletlerinin yaklaşık analiz sonuçları.....                                                                                             | 39 |
| Çizelge 4.13. Torefiye edilen çam peletlerinin kütle verimi, enerji verimi ve enerji yoğunluk oranları .....                                                                        | 42 |
| Çizelge 4.14. Torefiye edilen gül peletlerinin kütle verimi, enerji verimi ve enerji yoğunluk oranları .....                                                                        | 43 |
| Çizelge 4.15. Ham çam peletlerinin kırılma direnci .....                                                                                                                            | 45 |
| Çizelge 4.16. Ham gül peletlerinin kırılma direnci.....                                                                                                                             | 45 |
| Çizelge 4.17. Torefiye çam peletlerinin kırılma direnci .....                                                                                                                       | 45 |
| Çizelge 4.18. Torefiye gül peletlerinin kırılma direnci.....                                                                                                                        | 46 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                 |                                   |
|-----------------|-----------------------------------|
| AC              | Kül içeriği (%)                   |
| cm <sup>3</sup> | Santimetreküp                     |
| dk              | Dakika                            |
| FC              | Sabit karbon (%)                  |
| gr              | gram                              |
| HHV             | Üst ısı değeri (Mj/kg)            |
| kcal            | Kilo kalori                       |
| kg              | Kilogram                          |
| kWh             | Kilowatt saat                     |
| MC              | Nem içeriği (%)                   |
| Mf              | İstenilen nem miktarı (%)         |
| Mi              | İlk nem miktarı (%)               |
| Mj              | Megajoule                         |
| mm              | Milimetre                         |
| MTEP            | Milyon ton eşdeğer petrol         |
| TG              | Termogravimetri                   |
| TWh             | Terawatt saat                     |
| Ws              | Biyokütlenin ilk ağırlığı (gr)    |
| Ww              | Eklenmesi gereken su miktarı (gr) |

## 1. GİRİŞ

1973-2015 yılları arasında; dünyada petrolün payı %46,2'den %31,7'ye düşerken, doğal gazın payı %16'dan %21,6'ya, nükleer enerjinin payı %0,9'dan %4,9'a ve hidrolik dâhil yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payı ise %1,9'dan %4'e yükselmiştir (IEA, 2017). Aynı dönemde kömürün payı 3,6 puan artışla %24,5'den %28,1 düzeyine ulaşmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (UEA) tarafından öngörülen tahminlerde; dünya birincil enerji talebinin 2015 yılına göre yaklaşık %42 oranında artış göstererek 2040 yılında 19.299 MTEP seviyesine yükseleceği ve bu miktarın kaynaklara dağılımında da önemli farklılıkların olmayacağı ön görülmektedir. Bu ön görüye göre; 2040 yılındaki en büyük pay %28 ile petrolün olmaktadır. Petrolü %26 ile kömür ve %24 ile doğal gaz izlemektedir. Nükleer enerjinin payının %5, diğer kaynakların payının ise %17 olacağı ön görülmektedir (IEA, 2017). Ülkemiz için de benzer bir ön görü bulunmakla birlikte, 2016 yılı itibarıyla ülkemizdeki kömür üretimi; 70,2 milyon ton linyit, 1,3 milyon ton taşkömürü ve 1,5 milyon ton asfaltit olmak üzere, toplam 73 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (ETKB/EİGM, 2017). Linyit, ülkemizde en çok bulunan yerel enerji kaynaklarından biridir. Ancak Türkiye'deki linyitler düşük kalitededir. Sadece %8'nin ısı değeri 3.000 kcal/kg'ın üzerinde, %58'nin ısı değeri ise 1500 kcal/kg'ın altındadır. Bu yüzden; ülkemizde mevcut olan biyokütle kaynaklarını kullanarak hem çevre dostu hem de yüksek verimde enerji elde etmenin, enerjide dışa olan bağımlılığımızın azaltılmasına önemli katkılar sağlayacağı açıktır.

Türkiye'nin hızla gelişen ekonomisinden ve yüksek nüfus artışından dolayı; Türkiye'deki elektrik enerjisi tüketimi 2021 yılında bir önceki yıla göre %9,14 artarak 332,9 milyar kWh, elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %2,2 oranında artarak 334,7 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. Elektrik tüketimimizin, 2025 yılında 370 TWh, 2040 yılında ise 591 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir. 2022 yılı Ekim ayı sonu itibarıyla Türkiye'nin kurulu gücü 103.206 MW'a ulaşmıştır. 2022 yılı Ekim ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; yüzde 30,6'sı hidrolik enerji, yüzde 24,5'i doğal gaz, yüzde 21,1'i kömür, yüzde 10,9'u rüzgâr, yüzde 8,8'i güneş, yüzde 1,6'sı jeotermal ve yüzde 2,5'i ise diğer kaynaklar şeklindedir (Enerji, 2022). Enerji ihtiyacımızın günden güne artmasına rağmen, Türkiye birincil enerji talebinin %76'sını ithalat yoluyla karşılamaktadır. Enerji ihtiyacımızın kendi öz

kaynaklarımız ile karşılanması durumunda hem ülke ekonomimizin dışa bağımlılığının azaltılması hem de maliyetlerin azaltılması sağlanabilecektir (Gürel, 2020). Türkiye'nin biyokütle atık potansiyelinin yaklaşık 8,6 MTEP ve üretilebilecek biyogaz miktarının ise 1,5-2 MTEP olduğu tahmin edilmektedir. Ülkemizdeki biyokütle miktarlarına baktığımızda hayvansal ve bitkisel atıkların en büyük biyokütle kaynağı olduğu (yaklaşık %70) ve orman/orman endüstrisi atıklarının ise ikinci en büyük biyokütle kaynağını (yaklaşık 30%) oluşturduğu görülmektedir (Balat, 2005). Biyokütlenin yüksek basınçta (2-4 bar) sıkıştırılması ile elde edilen peletler ise dünyada biyokütleden enerji eldesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylece biyokütle; peletleme işlemi ile yararlı ve kullanılabilir ticari ürünlere dönüşmektedir (Yurdakul ve Civan, 2018). Peletler, 6-12 mm çapında ve 10-30 mm yüksekliğinde olan küçük, silindirik bir forma sahip olup üretimi ve kullanımı kolay olan yakıt ürünleridir (Küsek vd.,2015). Belli bir basınç altında, kullanılmak istenen malzemenin özelliklerine bağlı olarak (nem içeriği, uçucu madde, kül içeriği vb.) preslenme işlemiyle hazırlanırlar (Oberberger vd., 2004). Yakıt peletleri daha yüksek kütle ve enerji yoğunluğu, daha düşük taşıma maliyetleri ve daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağlarken, düşük nem içerikleri sayesinde de daha uzun süreli depolama imkânı sağlayabilmektedir (Işık, 2019). Greinert vd., (2020), biyokütleden elde edilen peletlerin kolay depolama/taşıma özellikleri, yüksek yakma verimliliği ve yüksek ısı değerine sahip olmaları ayrıca düşük emisyon ve toz oluşturmaları nedeniyle tercih edildiğini bildirmişlerdir.

Ahşap peletler yakıldığı zaman atmosfere yayılan CO<sub>2</sub> emisyonları karbon nötr kabul edilir. Çünkü odun peletlerinin yakılması sonucu oluşan CO<sub>2</sub> emisyonları, ağacın büyüme süresi içerisinde aldığı miktar kadardır (kapalı CO<sub>2</sub> döngüsü). Oysa, fosil yakıtların yakılması sonucu serbest kalan CO<sub>2</sub> ise milyonlarca yıl boyunca fosil yakıtın bünyesinde depolanmıştır. Dolayısıyla fosil yakıtların yakılması sonucu oluşan CO<sub>2</sub>, atmosferdeki CO<sub>2</sub> içeriğini artırmakta ve önemli ölçüde antropojenik sera etkisinden sorumlu olmaktadır. Ahşap peletler, fosil yakıtların yerine kullanırsa sadece yanma sonucu oluşan CO<sub>2</sub> emisyonlarını değil, aynı zamanda atmosfere salınan SO<sub>2</sub> emisyonlarının miktarını da azaltır (Karayılmazlar vd., 2011).

Biyokütle termokimyasal sistemlerde yakıt olarak kullanıldığında örneğin akışkan yataklı sistemlerde, biyokütlenin nem içeriğinin %25'in üzerinde olduğu durumlarda

besleme probleminin olduğu, dolayısıyla daha düşük nem değerleri ile çalışıldığı ve yüksek nem değerlerinde de emisyonların yüksek bulunduğu belirtilmektedir (Abelha vd., 2003; Zhu ve Lee, 2005; Li vd., 2018). Literatürde de belirtildiği üzere nem içeriği yüksek olan örneğin ham tavuk atığının, yatağa besleme zorluğundan dolayı (Abelha vd., 2003) peletlenerek yakılmalarının bu tür atıkların bertarafı açısından önem arz ettiği görölmektedir. Ayrıca pelet kullanıldığı takdirde farklı yakma sistemlerinde yakıt besleme sistemlerine ihtiyaç duyulmayacaktır. Bunun yanısıra peletlerin kompakt olmasından dolayı yanma odasındaki bekleme sürelerinin ve yanma verimliliğinin artmasına sebep olacağı yine literatürde belirtilmektedir (Greinert vd., 2020). Bu yüzden ön görölen çalışmada ölkemizde oluşan atık biyokütlenin peletlenerek yakılması halinde, daha yüksek yanma verimi ve daha düşük emisyonların oluşacağı beklenmektedir.

Ancak, yanma sistemlerinde biyokütle kullanıldığında ve bu biyokütle kömürle harmanlandığında düşük öğütülebilirlik, düşük enerji yoğunluğu, yüksek taşıma maliyeti ve çeşitli yanma özellikleri gibi bazı ekonomik ve teknik problemler meydana da gelebilmekte ve doğal olarak endüstrilerde yaygın olarak kullanılamamaktadır (Bada vd., 2014; Toptas vd., 2015). Bu dezavantajların üstesinden gelmek için, biyokütlenin termal kalitesini etkin bir şekilde yükseltebildiği ve katı biyokütleden türetilen yakıt (biyokömür) kalitesini iyileştirebildiği için, son on yılda endüstrilerde termokimyasal bir dönüştürme teknolojisi olan torefaksiyonun geliştirilmesi büyük ilgi görmüştür (Chen vd., 2021). Torefikasyon işlemi, pelet numunelerini yakıt özelliklerini ve yanma karakterizasyonlarını iyileştirmek amacıyla belli sıcaklıklarda ısıı işleme tabi tutmaktır. 150-280 °C olarak dar ısı penceresi içinde geręekleřtirilen ve neredeyse yeni bir işlem olan torefikasyon, ham biyokütleyi nispeten kokusuz, dumansız ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir katı yakıt haline dönüştürür (Dhungana vd., 2012). Torefiye edilmiş biyokütle, daha yüksek bir ısıtma değerine, daha iyi bir hidrofobikliğe, çürümeye karşı dayanıklı olma özelliğine ve uzun bir depolama süresine sahiptir (Eseyin vd., 2015). Biyokütleden biyoyakıt üretmek için, termokimyasal dönüşüm süreçleri arasında yer alan torefikasyonun işleminin diğer termokimyasal süreçler arasında en düşük küresel ısınma potansiyeline sahip olduğu yine literatürde belirtilmektedir (Chen vd., 2021). Bu yüzden hem enerji ihtiyacını ithalat yoluyla karşılayan hemde yerli kömür kalitesi genel anlamda düşük olan ve yüksek oranda kül, kükürt, nem ve alkali bileşik içeren kömür rezervlerine sahip

Ülkemiz için torefikasyon mevcut enerji açığımızın azaltılmasında ve mevcut biyokütle potansiyelimizden enerji eldesinin arttırılmasında oldukça önemli bir yere sahip olduğu aşıkardır.

Türkiye dünyada gl üretiminde birinci sırada yer almakta ve dünya gül yağı üretiminin %65'ini karşılamaktadır. Isparta, Türkiye'nin gl üretim merkezidir. 2019 yılında Isparta'da 14.000 ton gl (yağlık) retimi gerçekleştirilmiştir (Gl, 2020). Yıllık üretilen yağ gl damıtma atıkları ise yaklaşık olarak 18.235 ton olarak hesaplanmıştır (Tosun ve ark., 2002). Gülyağı ve gllerin ekstraksiyon yöntemi ile işlenmesinden elde edilen bir çeşit katı gül yağı olan konkret üretiminin yapıldığı tesislerden kaynaklanan proses atık suyu ve katı atıklar, tesis civarında açılmış toprak çukurlara veya dere yataklarına boaltılmaktadır. Bu durum, Isparta ve civarındaki yzeyssel ve yeraltı suları için önemli bir kirlilik kaynağını oluşturmakta, koku ve görüntü kirliliği gibi önemli evre sorunlarına neden olmaktadır (Tosun vd., 2002). Öte yandan, kızılçam (*Pinus brutia Ten.*), 5.610.215 hektarlık bir alanla Türkiye'deki en yaygın ağaç türüdür (Türkiye ormancılığı, 2019). Ayrıca 2020 yılında Türkiye'de orman ürünlerinden yaklaşık 850.000 m<sup>3</sup> odun artığı üretildiğini de belirtmek gerekir (FAOSTAT, 2022). Kısaca özetlenecek olursa; enerji konusunda nerdeyse dışa bağımlı olan ülkemiz için, temiz/sürdürülebilir enerji eldesinde ve cari açığı azaltmada mevcut biyokütle potansiyelinin kullanılması ülkemiz için stratejik bir öneme sahiptir.

### 1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın 3 amacı bulunmaktadır:

- AĞırlıkça nem ve katkı maddesi açısından farklı karışımları içeren biyopeletlerin hazırlanması,
- Hazırlanan peletlerin enerji yoğunluğunu arttırmak amacıyla torefiye edilmesi.
- Hazırlanan ham ve torefiye biyopeletlerin yakıt özelliklerinin incelenmesidir.

### 1.2. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada 2 farklı biyokütle (am talaı ve gl posası) ağırlıkça farklı yüzdelerde karıştırılarak biyopeletler hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan bu biyopeletlerin

torefikasyonu gerçekleştirilmiş ve hazırlanan peletlerin yakıt özellikleri (kütle, çap, uzunluk, özkütle ve parça yoğunluğu) incelenmiştir.

### **1.3. Biyokütle Nedir**

Biyokütle, yaşayan ya da yakın zamanda yaşamış canlılardan elde edilen fosilleşmemiş tüm biyolojik malzemenin genel adıdır. Biyokütle, bir enerji kaynağıdır ve endüstriyel anlamda biyokütle, bu biyolojik maddelerden yakıt elde edilmesi ya da diğer endüstriyel amaçlarla kullanılması ile ilgilidir (Whittaker ve Likens, 1975).

#### **1.3.1. Biyokütle enerjisi**

Biyokütle enerjisi, yeryüzünde yaşayan her türlü biyolojik kökenli organizmaların (bitkiler, ağaçlar, tohumlar vb.), güneş enerjisi yardımıyla gerçekleştirdikleri fotosentez sonucu bünyelerinde depoladıkları organik maddelerin, doğrudan ya da dolaylı olarak oluşturduğu biyokütlelerin (bitkisel atık, hayvan dışkısı vb.), fiziksel ya da kimyasal dönüştürme yöntemleriyle üretilen biyoyakıtlardan elde edilen ve ısınma, elektrik ya da sıvı yakıtlar gibi ihtiyaçların karşılanması amacıyla kullanılan bir enerji türüdür (Rosillo vd., 2007; Akdağ, 2007). Biyokütle enerjisi alternatif enerji kaynakları içerisinde büyük bir potansiyele sahip olup, rüzgar ve güneş gibi kesikli değil, sürekli enerji sağlayabilen bir kaynaktır. Spesifik özelliklere sahip biyokütle enerjisi küresel iklim değişikliği ve sera gazı salınımlarının azaltılmasında etkili olmaktadır. Yanma reaksiyonu sonucu ortaya çıkan CO<sub>2</sub> gazı yenilenen bitki örtüsü tarafından geri emildiğinden doğada mevcut olan karbon döngüsü sistemi dengede kalabilmektedir. Bu açıdan biyokütle enerjisi alternatif ve temiz bir enerji kaynağı sayılmaktadır. Biokütle enerjisinin kolay depolanabilir olması diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre avantajıdır (Aydın, 2018).

Çoğunlukla biyokütle odun ve odun atıklarından (% 64), kentsel katı atıklardan (% 24), tarımsal atıklardan (% 5) ve atık gazlardan (% 5) üretilir. Biyokütle enerjisi atıkların yakılması veya çeşitli proseslere sokulması ile elektrik veya ısı formunda elde edilir. Fosil yakıtlar birer biyokütle kaynağı değildir. Biyokütle kaynaklarının yakıldığında yarattıkları CO<sub>2</sub> salınımı fosil yakıtlara göre önemsiz olmayacak ve yeni

canlıların büyümesiyle var olan ekolojik döngünün absorbe edebileceği miktarlardadır (Aydın, 2018).

### 1.3.2. Biyokütle enerjisinin kaynakları

Biyokütle enerjisi'nin hammaddesi, geleneksel orman ürünlerinden, tarımsal ürünlere ve hatta evsel atıklara kadar geniş bir yelpazeden oluşmaktadır. Biyokütle enerjisi üretmek için kullanılan biyokütle kaynakları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir (IEA, 2009; Çağal, 2009).

- Akarsu tarafından sürüklenen atıklar,
- Ağaç atık ve artıkları (orman kalıntıları, odun işleme atıkları, inşaat kalıntıları),
- Odun, geri dönüşümlü ağaç (kısa rotasyon ormancılık, enerji ormancılığı),
- Tarımsal artık ve atıklar (dal, sap, saman, hayvan gübresi, vb.),
- Endüstriyel artıklar,
- Kentsel atıklar (çöpler, kanalizasyon çamuru vb.),
- Enerji bitkileri (ayçiçeği, pancar, sorgum, kenevir vb.).

### 1.3.3. Biyokütle enerjisi elde etme yöntemleri

Biyokütle materyalleri biyokütle çevirim teknikleri ile işlenerek katı, sıvı ve gaz yakıtlara çevrilir. Çevrim sonunda biyodizel, biyogaz, biyoetanol, pirolitik gaz gibi ana ürün olan yakıtların yanı sıra, gübre, hidrojen gibi yan ürünler de elde edilmektedir. Biyokütleden enerjinin yanı sıra, mobilya, kağıt, yalıtım malzemesi yapımı alanlarında da yararlanılmaktadır (Şenoğlu, 2019).

- **Doğrudan yakma:** Biyokütlenin doğrudan yakılarak enerji üretilmesi, bilinen en eski yöntem olmasına karşın, son yıllarda verimi yükseltmek için yeni yakma sistemleri geliştirilmektedir. Yanma, biyokütle içindeki yanabilir maddelerin oksijenle hızlı kimyasal tepkimesi olarak tanımlanır. Bu ısı veren bir tepkimedir ve kimyasal tepkime sonucu ortaya çıkan atık maddeler karbondioksit, su buharı ve bazı metal oksitlerdir (Şenoğlu, 2019).

- **Anaerobik çürütme:** Anaerobik çürütme biyolojik bir işlemdir. Oksijensiz ortamda yaşayabilen mikroorganizmalar tarafından yapılır.

Organik madde + bakteri + su = metan + karbondioksit + hidrojen, kükürt + kararlı, gübre + bakteri

olarak ifade edilir. Bu işlem ancak tümüyle oksijensiz bir ortamda gerçekleşebilir. Bilindiği gibi biyokütle, mikroorganizmalar yardımıyla, oksijensiz ortamda fermentasyona uğrayarak, geride değerli bir gübre, metan gazı ve karbondioksit bırakmaktadır (Şenoğlu, 2019).

- **Fermantasyon:** Biyokütlerde, bilindiği üzere değişik oranlarda, hemiselüloz ve lignin bulunmaktadır. Selüloz enzimatik hidrolizin arkasından uygulanan, kimyasal hidroliz, enzimler veya kimyasal işlemler ile glikozla parçalanabilir. Kimyasal hidroliz şartları bazen glikozu bozabildiği için, bu işlem son derece dikkatle yapılması gerekmektedir. Glikozun fermentasyonu ile etanol, aseton, bütanol gibi ürünlere eş değer birçok kimyasal ürün elde edilebilir (Şenoğlu, 2019).
- **Piroliz:** Piroliz, biyokütleden gaz elde etmek için kullanılan en eski ve basit bir yöntemdir. Oksijensiz ortamda odunun 900°C 'ye kadar ısıtılması ile oluşan kimyasal ve fiziksel olaylar dizisi olarak tanımlanır. Piroliz sonucu gazlar, katran, organik bileşikler, su ve odun kömürü gibi maddeler elde edilir (Şenoğlu, 2019).
- **Gazlaştırma:** Gazlaştırma, karbon içeren biyokütle gibi katıların yüksek sıcaklıkta bozunması ile yanabilir gaz elde etme işlemidir. Bu işlem sırasında denetimli bir şekilde yakıt hücresine verilen hava ile biyokütle yakılır. Çıkan ürünler arasında hidrojen, metan gibi yanabilir gazların yanı sıra karbonmonoksit, karbondioksit ve azot bulunur (Şenoğlu, 2019).
- **Biyofotoliz:** Biyofotoliz, bazı mikroskobik alglerden güneş enerjisi yardımıyla hidrojen ve oksijen elde edilme işlemidir. Deniz suyu içindeki bu algler bir tür güneş pili gibi çalışarak deniz suyunu fotosentetik olarak ayrıştırmaktadır (Şenoğlu, 2019).



#### **1.4. Pelet Nedir**

Biyokütle, dünyada dördüncü en büyük enerji kaynağını oluşturması yönüyle önemli bir enerji kaynağı konumundadır. Birçok gelişmiş ülke biyoenerjiyi geleceğin temel enerji kaynağı olarak görmektedir. Biyokütle ısınma ve sanayi amaçlı yakma sistemlerinde kullanılabilir. Isınma amaçlı olarak yaygın olarak kullanılan kaynaklardan biri de peletlerdir. Sözlük anlamı topak, yumak, silindir, misket olan pelet, yakıt olarak; her türlü odun, odun artığı, ormansal atık, tarımsal atık, endüstriyel atıkların kurutulup öğütülerek daha sonra yüksek basınçla preslenerek sıkıştırılması suretiyle yoğunluğu artırılarak enerji elde etme maksadıyla kullanılan küçük parçalardır (Küçükkaya, 2019).

##### **1.4.1. Pelet nerelerde kullanılır**

- Konutlar
- İşyerleri
- Sanayi Isınma
- Sanayi İmalat/Isıtma
- Elektrik Üretimi

##### **1.4.2. Pelet yakıtının özellikleri**

1000 gr pelet, yaklaşık 4500-5000 kcal/kg değerinde yani yaklaşık 5 kW enerji değerinde olup diğer bir deyişle 1 ton pelet 450-500 lt fuel-oil değerine karşılık gelmektedir. Yoğunluğu ise  $1000 \text{ kg/m}^3 - 1100 \text{ kg/m}^3$  arasındayken, nem değeri %7-%12 arasındadır. Pelet, biyokütle enerjisi yani yenilenebilir enerji kökenli bir yakıttır. Aynı zamanda, yerli ve doğal ürün/atıklardan üretildiği için enerji arzı güvenli bir kaynak olarak da nitelendirilmektedir.

Peletler, termokimyasal sistemlerde yakıldığında fosil yakıtlara kıyasla daha düşük seviyelerde emisyon oluşturur. Nemi alınarak yüksek basınçta sıkıştırıldığı için de kül oranı %1 seviyelerindedir. Diğer bir ifadeyle; 1-ton pellet yakıldığı zaman yaklaşık 10 kg kül oluşturmaktadır. Ancak, kömürde yakıldığı zaman kalitesine göre %20 – %50

aralığında kül/cüruf oluşturmaktadır. Bununla birlikte, peletin yakılması sonucu oluşan kül, doğal gübre olarak da tarımda kullanılabilir. Yanma süresi ve sağladığı enerji bakımından da aynı miktarda oduna kıyasla daha verimli bir yakıttır (Pelet yakıtının özellikleri, 2022).

### 1.5. Torefikasyon Nedir

Biyokütle düşük kütle yoğunluğu, yüksek nem ve oksijen içeriği nedeniyle, taşıma ve depolama sırasında birtakım zorluklar yaratır. Bu sorunlar biyokütlenin yaygın kullanımı için engel yaratmaktadır (Cowdhury vd., 2017). Ayrıca yüksek oranda alkali ve klor içermesi nedeniyle de yanma ve birlikte yanma süreçlerinde korozyon, tıkanma ve cüruf oluşumu nedeniyle katı yakıtlı kazanların arızalanmasına neden olur (Hardy vd., 2012). Bu sorunları çözmeye biyokütleyi potansiyel bir katı yakıta dönüştürebilen torefikasyon yöntemi son zamanlarda kullanılmaktadır. Termokimyasal çevrim yöntemlerinden biri olan karbonlaştırma (torefikasyon) yöntemi, genel olarak çeşitli biyokütle kaynaklarının 220-350°C sıcaklıkta oksijensiz ortamda kömürleşme işlemidir. Karbonlaştırma (torefikasyon) yoluyla biyokütleden biyokömür elde edilmektedir. Elde edilen biyokömür, fosil yakıtlardan türetilen enerji bakımından daha temiz bir alternatif enerji kaynağıdır (Batur, 2017). Torefikasyon ile üretilen kömür genellikle hidrofobiktir ve daha az nem içerir (Sadaka ve Negi 2009). Torefikasyon işlemi ham biyokütlenin hem enerji yoğunluğunu (Prins vd., 2006; Yan vd., 2009; Rousset vd., 2011) hem de üst ısı değerlerini (HHV) (Bridgeman vd., 2008; Couhert vd., 2009; Deng vd., 2009; Yan vd., 2009). Ham biyokütlenin biyopelet ve torefiye biyopelet ile özellikleri açısından karşılaştırması Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Torefikasyon son yıllarda biyokütle ön arıtmasının odak noktası haline gelmiştir. Torefikasyondan sonra, kütle ve enerji yoğunluğu, hidrofobiklik, tutuşabilirlik, yanma ve gazlaştırma reaktivitesi ve öğütülebilirlik gibi biyokütlenin özellikleri önemli ölçüde iyileşir (Chen ve Kuo, 2011). Torefiye biyokütle, yanma sırasında toz haline getirilmiş kömürle (Chen ve Wu, 2009) veya gazlaştırıcıya besleme stoğu olarak (Deng vd., 2009) verilebilmektedir. Özetle, torefiye biyokütlenin avantajları arasında;

- 1) Daha düşük nem (Yang vd., 2009). Sınırlı nem içeriği, gazlaştırma için faydalı olan sentez gazındaki hidrojen içeriğini daha da artırır (Acharjee vd., 2011),
- 2) Daha yüksek enerji yoğunluğu, kütle yoğunluğu ve ısı değeri (Valix vd., 2017; Pahla vd., 2018; Kanwal vd., 2019). Bunlar biyokütlenin hacmini azaltır ve böylece kullanım veya sonraki işlemler için taşıma mesafesini uzatır,
- 3) İyi hidrofobiklik (Yang vd., 2019; Pahla vd., 2018, Xin vd., 2019). Torefikasyon sırasında hidroksil gruplarının kaybına bağlı olarak (Phanphanich ve Mani, 2011; Kanwal vd., 2019), torefiye biyokütle, düşük nem, bozunma ve çürüme riskiyle (Chen ve Kuo, 2011) açıkta uzun süre saklanabilir,
- 4) Geliştirilmiş öğütülebilirlik (Kanwal vd., 2019). Lifli yapının kaybolması, torefiye biyokütlenin Phanphanich ve Mani, 2011) parçacık boyutunun azalmasına neden olur, bu da öğütme için enerji tüketimini azaltır (Yang vd., 2019),
- 5) Azaltılmış O/C oranı (Hu vd., 2017; Pahla vd., 2018; Yang vd., 2019). Yüksek gazlaştırma verimliliği (Prins vd., 2006; Wang vd., 2011) ve yanmada daha az duman (Van der Stelt vd., 2011) ile sonuçlanır;

Azaltılmış mevsimsel etkiler (Arias vd., 2008), düşük depolama maliyetleri (Medic vd., 2010), geliştirilmiş toz akışkanlığı (Xu vd., 2019) vb. yer almaktadır.

Çizelge 1.1. Ham biyokütlenin biyopelet ve torefiye biyopelet ile özellikleri açısından karşılaştırması

| Değerlendirme Kriterleri                                          | Ham biyokütle                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Biyopelet                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Torefiye Biyopelet                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Akışkan Yatkı Kazanda Yakılması sırasında karşılaşılan problemler | Yüksek nem içeriği sebebiyle biyokütlenin yanma verimi düşüktür ve termokimyasal dönüşüm maliyetleri fazladır (Haykiri-Acma vd., 2016). İlâveten nemli yakıtın kazana besleme zorluğu bulunmaktadır. Lifli yapısı öğütülmesini zorlaştırmaktadır. Isı transferi yüzeylerinde birikmeleri önleyebilmek için ya kurutularak ya da yüzde 75 gibi yüksek bir oranda linyitle karıştırılarak yakılması gerekmektedir. | Hem kazana beslemesi kolay ve nem oranının ham hali ne göre daha düşük olduğu için hem de peletlenme sonucu enerji yoğunluğu arttığı için yanma verimi daha yüksektir (Greinert vd., 2020).<br><br>Ham biyokütle ile karşılaştırıldığında, peletlerin yanması, PM'nin atmosfere daha düşük emisyonu ile sonuçlanır (Amaral vd., 2016). | Kazana beslemesi kolay, nem oranı düşük ve sabit karbon içeriği yani HHV'si daha yüksek olduğu için (Ribeiro vd., 2018) yanma veriminin hem ham biyokütleden hem de biyopeletten daha yüksek olacağı öngörülmektedir (Isemin vd., 2017). Ayrıca ham peletlere kıyasla daha düşük CO, NO <sub>x</sub> ve CH <sub>4</sub> emisyonlarına neden olacağı ön görülmektedir (Maxwell vd., 2020).<br><br>Ayrıca, torefikasyon prosesi sırasında büyük miktarda Cl, S ve K salınımı gerçekleşmektedir (Niu vd., 2019). Böylece biyopeletlerin torefiye edilmesi ile, biyopeletlerin yakılması sırasında ortaya çıkan cüruf, aglomerasyon ve korozyon gibi genel sorunların azaltılacağı veya ortadan kalkacağı öngörülmektedir. |
| Depolanması                                                       | Ham biyokütlenin depolanması, büyük hacim, yüksek nem ve organik madde içeriği nedeniyle koku, bozunma, sinek/böcek ve yer altı suyu sızıntı vb. problemlere sebep olmaktadır.                                                                                                                                                                                                                                   | Yoğunlaştırma genellikle taşıma ve depolama koşullarını iyileştirmek için gereklidir (Nunes vd., 2014). Aynı zamanda ürünün mukavemetini de artırır. Dolayısıyla, Biyopeletlerin depolama koşullarının iyileştirilmesi açısından ham biyokütleye göre daha kullanışlı olacaktır.                                                       | Torefiye biyokütlenin yoğunlaştırılması, peletleme yoluyla yapılabilir (Melero vd., 2012). Torefiye Edilmiş Biyopeletlerin ham biyokütle ve Biyopeletlere göre daha az hacim ve çok daha az nem çekme özellikleri kazanacaklarından dolayı daha uzun süreli ve daha az koku ve bozunma vb. problemi yaşanmadan daha verimli depolanabileceği ön görülmektedir (Yurdakul ve Civan, 2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Taşınması                                                         | Düşük enerji ve kütle yoğunluğu ile büyük hacimlerinin uzun mesafe taşınması maliyeti olumsuz etkiler (He vd., 2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Peletlenmiş biyopeletlerin hem enerji yoğunlukları artış gösterecektir hem de paketlenerek taşınabilmektedirler. Bu durum taşıma maliyetlerini düşürmektedir (Greinert vd., 2020).                                                                                                                                                     | Torefikasyon peletleme ile birleştirilirse, biyokütle yakıtlarının enerji yoğunluğu önemli ölçüde artmakta ve böylece yakıtın taşınmasında enerji ve emisyon tasarrufu sağlanabilmektedir (Kohl vd., 2013).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Tumuluru vd. (2011), torefikasyon işlemini üç sıcaklık bölgesine ayırarak süreci tanımlamıştır; 1) reaktif olmayan (örneğin, 50–150°C); 2) reaktif (örneğin 150–200°C); ve 3) yıkıcı (örneğin, 200–300°C). Bu sıcaklık rejimlerinde çeşitli biyokütle reaksiyonları şunları içerir: 1) dehidrasyon; 2) hemiselülozun uçucu hale getirilmesi ve karbonizasyonu; 3) ligninin depolimerizasyonu ve buharlaşması/yumuşaması; ve 4) depolimerizasyon selülozun buharlaşması. Bu reaksiyonlar biyokütlenin fiziksel özelliklerinde, kimyasal bileşiminde ve enerji içeriğinde önemli değişikliklere yol açar. Bu değişiklikler sıcaklığa, bekleme süresine, ısıtma hızına, biyokütle tipine ve başlangıç nemi, partikül boyutu ve şekli gibi özelliklere bağlıdır. Biyokütlenin 150°C'ye kadar ilk ısıtılması (örneğin reaktif olmayan kurutma bölgesi) bağlı olmayan suyu uzaklaştırır. Sıcaklığın 150–200°C'ye yükseltilmesi bağlı suyun çoğunu uzaklaştırır. >200°C sıcaklıklar termal bozunma, buharlaşma ve karbonizasyon reaksiyonlarına neden olur. Biyokütlerdeki lignin, lignin moleküllerinin daha hareketli hale geldiği cam geçiş (glass transition) sıcaklığında yumuşar. Çoğu biyokütle hemiselülozun renk, kimyasal bileşim ve fiziksel özelliklerinde önemli değişiklikleriyle sonuçlanan ayrışma reaksiyonlarına girer. >280°C'den daha yüksek sıcaklıklarda, bu reaksiyonlar gaz halinde CO, CO<sub>2</sub>, fenoller, asetik asit ve diğer yüksek uçucu hidrokarbonlar üretebilir. Bu reaksiyonlar, O-H ve C=O gruplarının fonksiyonel gruplarını yok eden, böylece biyokütleyi hidrofobik hale getiren ve depolama stabilitesini artıran hemiselüloz bozulmasına neden olur.

Mani vd., (2006), 4 farklı (buğday samanı, arpa samanı, mısır koçanı, şalt otu) çimden yapılan biyopeletlerin parçacık boyutu ve nem içeriğinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çimler 3 farklı (0,8; 1,6; 3,2 mm) tanecik boyutunda ve 2 farklı (%12; %15) nem içeriğinde üretilmiştir. Sonuç olarak, arpa samanı, mısır koçanı, şalt otu pelet yoğunluğunu etkilerken buğday samanı etkilenmemiştir. Ayrıca mısır koçanının %12 nem içeriği ve 3,22 mm tanecik boyutunda 1136 kg/m<sup>3</sup> ile en yüksek pelet yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür.

Küsek vd., (2015), çalışmasında tarımsal atıkların önemi ülkemizde ve dünyada bir hayli arttığı ve tarımsal atıklardan oluşturulan katı yakıtların hem atıkların avantajlı değerlendirilmesi hem de elde edilecek yakıtların enerji bağımlılığını azaltacağı

bilinmektedir. Tarımsal atıklardan enerji üretmek için en etkili yollardan birisi bu atıkları katı yakıt olan biyopeletler haline getirmektir. Biyokütle materyalin peletlemesi ile hacimsel ısı değeri artar, taşıma ve depolama maliyetleri azalır, yanma özellikleri iyileşir, atmosfere salınan parçacık emisyonları azalır ve aynı boyut/şekilde daha üstün özelliklere sahip bir biyoyakıt elde edilmektedir. Bu çalışmada; biyopeletlerin özellikleri, peletleme işleminin yararları, peletleme uygulamalarında işlem akışı, peletleme teknolojisi ve peletleme işleminde etkili materyal özellikleri incelenmiştir.

Koçer vd., (2016), çalışmasında çay fabrikası atıklarını öğütürerek %12,68 nem içeriğinde ve 0,62 cm tanecik boyutunda, 23,5 mm uzunluğunda ve 0,8 gr ağırlığındadır. Üretilen peletlerin fiziksel (hacim yoğunluğu, parça yoğunluğu, mekanik dayanıklılığı, basınç direnci) ve nem alma özellikleri incelenmiştir. İncelenen peletlerin hacmi  $60 \text{ kg/m}^3$  ve parça yoğunluğu  $1.158 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Mekanik dayanım direnci %81 ve basınç direnci ise 476 N olarak ölçülmüştür. Bu çalışma sonucunda peletlerin nem alma direnci ortam sıcaklığı ve neme bağlı olarak değişmiştir.

Alparslan vd., (2018), bu çalışmada karanfil saplarını kullanarak biyokütleden enerji elde etmeyi araştırmıştır. Üretilen peletler ortalama 6,3-6,4 mm çapında, parça yoğunlukları  $1098,37\text{-}1146,40 \text{ kg/m}^3$ , dayanımı %94,80-96,40, nem alma direnci ise %18,5-20'dir. Pelet makinesinin üretim kapasitesi ve elektrik enerjisi tüketim değerleri ise, materyal boyutuna bağlı olarak sırasıyla 89,76-104,8 kg/h ve 6,64-7,37 kWh olarak bulunmuştur.

Hudakorn ve Sritrakul (2019), su sümbülü ile biyokütle peletleri üretmeyi araştırmıştır. İlk olarak yaprakları ayıklamışlar, ardından su ve lif olarak ikiye ayırmışlardır. Ayıklanan sümbüller dört farklı (5-95; 10-90; 15-85; 20-80) su oranında karıştırılmıştır. Ardından yassı kalıplı pelet makinesi ile peletler üretilmiştir. Üretilen peletlerin dayanıklılığı sırasıyla  $\%88,80 \pm 2,4$ ,  $\%96,36 \pm \%2,6$ ,  $\%97,16 \pm 3,23$ ,  $\%98,18 \pm \%1,36$  bulunmuştur. Sonuç olarak ham maddenin nem içeriği ne kadar yüksekse dayanıklılığının da o kadar yüksek olduğu bulunmuştur.

Fadimatou vd., (2021), Arap zambkı olarak kullanılan pirinç kabuğundan yapılan biyopeletlerin termofiziksel kalitesini araştırmıştır. Kurutulmuş ve ezilmiş pirinç

kabukları 1/2; 1/3 ve 1/4 oranında su ile karıştırılmıştır. Biyopeletin termofiziksel (dayanımı, kırılabilirliği ve alt ısı değeri) kalitesinin peletin üretiminde kullanılan bağlayıcının ve suyun miktarına bağlı olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak 1/2 oranında (su içeriği %7,97, dayanımı  $199,977 \pm 2,523$  mPa, kırılabilirlik indeksi  $0,44 \pm 0,021$ , alt ısı değeri  $1.879 \pm 12,056$  kcal/kg) karıştırılan peletlerin en iyi termofiziksel özelliklere sahip olduğu bulunmuştur.



### 3. MATERYAL VE METOD

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Çevre Mühendisliği Atıksu Arıtma Laboratuvarında, Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Biyokütle Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada peletlerin üretilmesi sırasında iki çeşit biyokütle; Gürkan Gül Yağı Fabrikasından temin edilen yağ gülü (*Rosa damascena Mill.*) damıtma atığı/posa ve Isparta'da bir kereste fabrikasından alınan kızılçam talaşı (*Pinus brutia Ten.*) kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan malzemelerin nem oranları çalışma öncesi kontrol edilmiş olup kullanılacak gül posası nem oranının yüksek olduğu tespit edilmiştir ( $68\% \pm 5,14\%$ ). Çalışmada temin edilen gül posası yüksek nem içeriğine sahip olduğu için organik malzemenin bozulmaması için atık malzeme önce oda sıcaklığında serilerek kurutulmuş ardından etüvde ( $70^{\circ}\text{C}$ 'de 3 saat) kurutulmuştur. Kurutulan malzemelerin nem oranı  $6,25\% \pm 2,17\%$  oranına düşmüştür. Kereste fabrikasından temin edilen kızılçam talaşının nem içeriği ( $<10\%$ ) düşük olduğu için ekstra bir kurutma işlemi gerçekleştirilmemiştir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Oda sıcaklığında ve sonrasında etüvde kurutulan malzemeler

İlk aşamada pelet basılması için kullanılacak önce oda sıcaklığında kurutulup daha sonra etüvde ( $70^{\circ}\text{C}$ 'de 3 saat) kurutma işlemi tamamlanan ham gül posası Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu çalışmada yaklaşık analizlerde; uçucu madde miktarının tayini için sırasıyla ASTM E-872 ve ASTM D-3175-18, kül tayini için E-1755-01 ve D-3174, nem tayini için D-871-82-2019 ve D-3173/3173M-17a kullanılmış ve sabit karbon



miktarı da fark kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan ham malzemelerin elementel ve yaklaşık analiz sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Elementel analizler ODTÜ Merkezi Laboratuvarında hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Ham gül posası

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan malzemelerin elementel ve yaklaşık analizleri

|                               | Nem<br>(%) | Uçucu madde<br>(%) | Sabit karbon<br>(%) | Kül<br>(%) | HHV<br>(kcal/kg) |
|-------------------------------|------------|--------------------|---------------------|------------|------------------|
| <b>Ham<br/>çam</b>            | 8,20±1,08  | 85,15±2,94         | 5,45±2,31           | 1,20±0,45  | 4261,47±380,01   |
| <b>Ham<br/>gül<br/>posası</b> | 6,25±2,17  | 77,45±4,85         | 9,56±2,33           | 6,75±0,46  | 4153,91±193,59   |
|                               | % C        | % H                | % N                 | % S        | % O*             |
| <b>Ham<br/>çam</b>            | 48,18      | 6,40               | -                   | -          | 45,42            |
| <b>Ham<br/>gül<br/>posası</b> | 45,58      | 6,02               | 4,14                | 0,29       | 43,97            |

\*Fark kullanılarak hesaplanmıştır.

Süleyman Demirel Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarında Şekil 3.3'te verilen bilyalı öğütücü ile ham gül öğütülmüştür. Kızılçam talaşı toz halinde olduğu için herhangi bir öğütülme işlemine tabi tutulmamıştır.



Şekil 3.3. Bilyalı Değirmen

Öğütölmüş gül numuneleri ve satın alınan çam talaşı 2 mm ile 250 µm arasında elenmiştir (Şekil 3.4.). Daha sonra elenen numuneler, hava ve nem almaması için kilitli poşetlere koyulmuştur ve silika jel eklenerek kapalı kaplarda muhafaza edilmiştir. (Şekil 3.5.).



Şekil 3.4. 2 mm ile 250 µm arasında elenen gül posası



Şekil 3.5. Kilitli poşetlerde muhafaza edilen gül ve kızılçam talaşı

### 3.1. Elek analizi

Peletleme yapılabilmesi için partikül çapının 2 mm'nin altında olması istenmektedir. Çalışmada 2 mm'nin altına elenen malzemenin partikül boyutunun dağılımını görebilmek amacıyla elek analizi de gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Elek analizi kayıp ve hataları

| Elek Çapı      | Gül (200 gr)<br>Üstte Kalan | Elek Çapı            | Talaş (202,16 gr)<br>Üstte Kalan |
|----------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------------|
| 2 mm           | 0,00 gr                     | 2 mm                 | 0,00 gr                          |
| 1,7mm          | 36,35 gr                    | 1,7 mm               | 103,91 gr                        |
| 1,18mm         | 49,90 gr                    | 1,18 mm              | 40,60 gr                         |
| 850 µm         | 31,36 gr                    | 850 µm               | 28,34 gr                         |
| 600 µm         | 42,07 gr                    | 710 µm               | 7,29 gr                          |
| 425 µm         | 18,23 gr                    | 600 µm               | 2,12 gr                          |
| 250 µm         | 16,19 gr                    | 425 µm               | 3,03 gr                          |
| <250 µm        | 5,54 gr                     | 250 µm               | 11,64 gr                         |
|                |                             | <250 µm              | 5,22 gr                          |
| <b>Toplam</b>  | 199,64 gr                   | <b>Toplam</b>        | 202,15 gr                        |
| Kayıp Hatası   | %0,18                       | Kayıp Hatası         | %0,005                           |
| <0,250 mm için | %2,77                       | <0,250 mm için Kayıp | %2,58                            |
| Kayıp hatası   |                             | hatası               |                                  |

Kayıp ve elek altı hataları gül ve çam talaşı için %3'ten düşük bulunmuştur. Tüm malzemeler hazırlandıktan sonra, ağırlıkça farklı yüzdeler ve biyokütle oranları kullanılarak 3 kw'lık bir peletleme makinasında peletleme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Çalışmada kullanılan 3 kw'lık pelet makinası

### 3.2. Optimum Torefikasyon Süresi ve Sıcaklığının Belirlenmesi için Gerçekleştirilen Ön Deneyler

Optimum torefikasyon sıcaklığı ve süresinin belirlemek için biyokütleler ile bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan gül posası ve çam talaşı alüminyum folyo ile kapatılarak 50 cm<sup>3</sup>'lük kapaklı seramik krozelere koyulmuş, ardından da kül fırınında torefiye edilmiştir (Şekil 3.7). Çalışma sıcaklığı literatürde biyokütle ile daha önce gerçekleştirilen çalışmalara benzer olarak 250-300°C arasında gerçekleştirilmiştir (Bada vd., 2014; Shoulaifar vd., 2014; Toptaş vd., 2015).



Şekil 3.7. Torefikasyon için hazırlanan gül posası ve kızılçam talaşı

Ön deneylerde sıcaklığın yanısıra ayrıca 3 farklı bekleme süresi (15 dk, 30 dk, 60 dk) ve üç farklı (250°C, 270°C, 290°C) torefikasyon sıcaklığı denenmiştir. Yapılan ön deneyler sonucunda optimum sıcaklık ve bekleme süresi en fazla enerji yoğunluğunu

veren 270 °C ve 1 saat olarak bulunmuştur. Torefiye edilen çam peletleri Şekil 3.8’de, gül peletleri ise Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.8. %50 - %55 - %60 nem oranlarında torefiye edilen çam peletleri



Şekil 3.9. %50, %55 ve %60 nem oranlarında torefiye edilen gül peletleri

### 3.3. Peletlerdeki Optimum Nem ve Bağlayıcı Oranın Belirlenmesi

Standartlara uygun peletlerin üretilmesi adına, optimum nem ve bağlayıcı oranını belirleyebilmek için biyokütleler farklı nem ve bağlayıcı oranları kullanarak peletlenmiştir. Deneyler sırasında bağlayıcı olarak mısır nişastası kullanılmıştır ve optimum bağlayıcı oranı için 4 farklı (%0, %2, %4 ve %6) nişasta katkı oranı denenmiştir. Gül posasının orijinal nem oranı yaklaşık %70’tir. Deneylerde 7 farklı (%35, %40, %45, %50, %55, %60 ve %65) nem oranı denenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; nem %45’in altına düştüğünde pelet mevcut pelet makinası ile hazırlanamamıştır. Ayrıca nem %60’ın üstüne çıktığında da malzemeler sulu olduğundan dolayı mevcut pelet makinasının deliklerinin tıkanmasına neden olmuştur. Çam peletleri %45 nem oranında hazırlanabilirken, gül peletlerinin hazırlanabilmesi için en az %50 oranında bir neme ihtiyaç duyulmuştur, dolayısıyla gül numuneleri en düşük %50 nem ile hazırlanabilmiştir. %45 nem ile hazırlanan peletlerin formları ve dayanımları düşük olduğu için sadece tek bir karışım hazırlanmıştır. Özetlenecek

olursa; bu çalışmada mevcut pelet makinasının koşulları kapsamında yukarıda belirtilen gerekçelerden dolayı %45'in altı ve %60'ın üstündeki nem oranları biyo-peletlerin hazırlanması için kullanılmamıştır.

### 3.4. Karışımın Hazırlanması

Pelet karışımlarında istenilen nem oranlarının hazırlanmasında aşağıda verilen Denklem 3.1 kullanılmıştır.

$$W_w = W_s * \frac{(M_f - M_i)}{(100 - M_f)} \quad (3.1)$$

Denklemde verilen:

$W_w$  = Eklenecek su miktarı (gr)

$M_f$  = İstenilen nem miktarı (%)

$M_i$  = İlk nem değeri (%)

$W_s$  = Kullanılan biyokütlenin ağırlığı (gr)

Gül posası peletlerinin hazırlanmasında kullanılan hesaplamalar Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5'te verilmiştir. Çam talaşı peletlerinin hazırlanmasında kullanılan hesaplamalar ise Çizelge 3.6, Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. %50 nem oranında gül posası peletleri

| İstenilen nem içeriğine sahip pelet hazırlanması |         |              |             |
|--------------------------------------------------|---------|--------------|-------------|
| Gül Nem İçeriği %50                              |         |              |             |
| Gül (gr)                                         | Su (gr) | Nişasta (gr) | Nişasta (%) |
| 200                                              | 180     | 0,00         | 0           |
| 192,55                                           | 180     | 7,45         | 2           |
| 185,39                                           | 180     | 14,61        | 4           |
| 178,5                                            | 180     | 21,50        | 6           |

Çizelge 3.4. %55 nem oranında gül posası peletleri

| <b>İstenilen nem içeriğine sahip pelet hazırlanması</b> |                |                     |                    |
|---------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| <b>Gül Nem İçeriği %55</b>                              |                |                     |                    |
| <b>Gül (gr)</b>                                         | <b>Su (gr)</b> | <b>Nişasta (gr)</b> | <b>Nişasta (%)</b> |
| <b>200</b>                                              | 222,2          | 0,00                | 0                  |
| <b>191,72</b>                                           | 222,2          | 8,28                | 2                  |
| <b>183,72</b>                                           | 222,2          | 16,23               | 4                  |
| <b>176,11</b>                                           | 222,2          | 23,89               | 6                  |

Çizelge 3.5. %60 nem oranında gül posası peletleri

| <b>İstenilen Nem İçeriğine Sahip Pelet Hazırlanması</b> |                |                     |                    |
|---------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| <b>Gül Nem İçeriği %60</b>                              |                |                     |                    |
| <b>Gül (gr)</b>                                         | <b>Su (gr)</b> | <b>Nişasta (gr)</b> | <b>Nişasta (%)</b> |
| <b>200</b>                                              | 275            | 0,00                | 0                  |
| <b>190,69</b>                                           | 275            | 9,31                | 2                  |
| <b>181,74</b>                                           | 275            | 18,26               | 4                  |
| <b>173,12</b>                                           | 275            | 26,88               | 6                  |

Çizelge 3.6. %50 nem oranında çam talaşı peletleri

| <b>İstenilen Nem İçeriğine Sahip Pelet Hazırlanması</b> |                |                     |                    |
|---------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| <b>Çam Talaşı Nem İçeriği %50</b>                       |                |                     |                    |
| <b>Talaş (gr)</b>                                       | <b>Su (gr)</b> | <b>Nişasta (gr)</b> | <b>Nişasta (%)</b> |
| <b>200</b>                                              | 172            | 0,00                | 0                  |
| <b>192,7</b>                                            | 172            | 7,294               | 2                  |
| <b>185,693</b>                                          | 172            | 14,307              | 4                  |
| <b>178,95</b>                                           | 172            | 21,05               | 6                  |

Çizelge 3.7. %55 nem oranında çam talaşı peletleri

| İstenilen Nem İçeriğine Sahip Pelet Hazırlanması |         |              |             |
|--------------------------------------------------|---------|--------------|-------------|
| Çam Talaşı Nem İçeriği %55                       |         |              |             |
| Talaş (gr)                                       | Su (gr) | Nişasta (gr) | Nişasta (%) |
| 200                                              | 213,33  | 0,00         | 0           |
| 191,9                                            | 213,33  | 8,1          | 2           |
| 184,11                                           | 213,33  | 15,89        | 4           |
| 176,61                                           | 213,33  | 23,39        | 6           |

Çizelge 3.8. %60 nem oranında çam talaşı peletleri

| İstenilen Nem İçeriğine Sahip Pelet Hazırlanması |         |              |             |
|--------------------------------------------------|---------|--------------|-------------|
| Çam Talaşı Nem İçeriği %60                       |         |              |             |
| Talaş (gr)                                       | Su (gr) | Nişasta (gr) | Nişasta (%) |
| 200                                              | 265     | 0            | 0           |
| 190,89                                           | 265     | 9,11         | 2           |
| 182,12                                           | 265     | 17,88        | 4           |
| 173,68                                           | 265     | 26,32        | 6           |

### 3.5. Torefiye Peletlerin Kütle ve Enerji Veriminin Hesaplanması

Enerji ve kütle verimi pelet numunelerinin yanma işlemi sonrasında geriye ne kadar enerjisi ve kütlesi kaldığını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada da torefiye edilen malzemelerin enerji ve kütle verimini hesaplamada aşağıdaki denklemlerde verilen formüller kullanılmıştır (Dhungana, 2011).

$$\text{Kütle verimi (\%)} = \frac{\text{Torefiye olmuş biyokütlenin kütlesi (t süre)(gr)}}{\text{Torefiye olmadan önceki biyokütlenin kütlesi (t süre)(gr)}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{Enerji verimi (\%)} = \frac{\text{Torefiye olmuş ürünün kütlesi (gr)} \times \text{Torefiye olmuş ürünün ısı değeri}}{\text{Normal biyokütlenin kütlesi (gr)} \times \text{Normal biyokütlenin ısı değeri}} \times 100 \quad (3.3)$$

Bu eşitliklerde kütle verimi, torefiye işleminden sonra kalan biyokütlenin başlangıçtaki kuru kül serbest kütlesinin oranını verirken, enerji verimi, torefiye



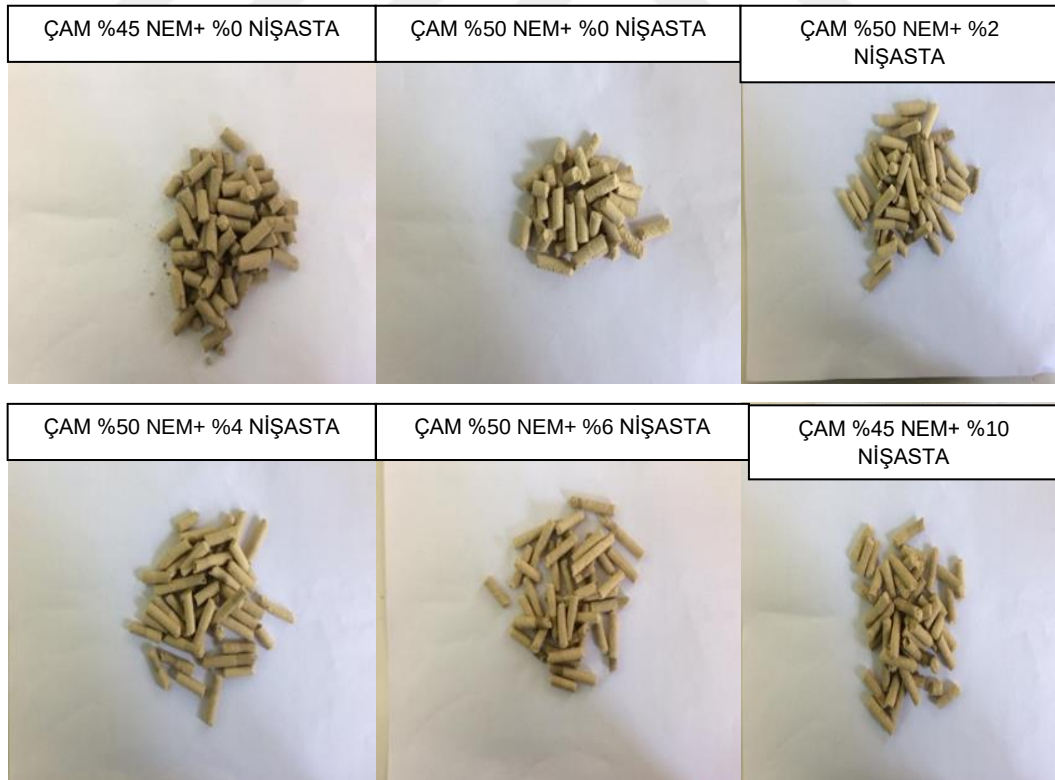
biyokütlenin içinde kalmış orijinal kuru biyokütledeki toplam kimyasal enerjinin oranını verir (Dhungana, 2011).

Bu çalışmada enerji yoğunluk oranı hesabı için aşağıdaki formül kullanılmıştır (Dhungana, 2011);

$$\text{Enerji Yoğunluk Oranı} = \frac{\text{Torefiye edilmiş numunenin üst ısı değeri}}{\text{Normal numunenin üst ısı değeri}} \quad (3.4)$$

### 3.6. Peletlerin Hazırlanması

Yapılan deneyler sonucunda farklı nişasta ve nem oranları kullanarak peletler hazırlanmıştır. Hazırlanan biyokütle karışımları poşetlere koyularak buzdolabında 24 saat bekletilmiştir. Ardından oda sıcaklığında elektrikli ocakta 90°C'ye kadar ısıtılmıştır. Isıtılan ham biyokütleler daha sonra pelet makinasına beslenmiştir. Pelet makinasında hazırlanan peletler Şekil 3.10. ile Şekil 3.15. arasında verilmiştir.



Şekil 3.10. %45 nem + %0 nişasta ile % 50 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan çam peletleri



Şekil 3.11. % 55 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan çam peletleri



Şekil 3.12. % 60 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan çam peletleri



Şekil 3.13. % 50 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan gül peletleri



Şekil 3.14. % 55 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan gül peletleri



Şekil 3.15. % 60 nem ve farklı bağlayıcı oranları kullanılarak hazırlanan gül peletleri

Bu tez çalışmasında elde edilen bulguların değerlendirilebilmesi için, IBM SPSS 16.0 İstatistik yazılımı kullanılarak bivariate (ikili) Pearson korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz neticesinde elde edilen bulguların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı incelenmiştir.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

##### 4.1. Farklı Nem ve Bağlayıcı Oranı Kullanılarak Hazırlanan Ham Çam ve Ham Gül Peletlerinin Yakıt Özelliklerinin İncelenmesi

Hazırlanan peletler dış görünüşlerine göre incelendiğinde; bağlayıcı içermeyen veya yüksek nem oranına sahip peletlerde dış yapıda bozulmalar olduğu görülmüştür. Bu anlamda daha doğru bir nem ve bağlayıcı oranı tespiti yapabilmek adına hazırlanan peletlerin yakıt özellikleri de incelenmiştir (Çizelge 4.1, Çizelge 4.2.).

ISO 17225-1 standardında endüstriyel pelet kazanları için, ağaç endüstrisinden gelen atıkların ve biyokütlenin çapının  $>6\pm 1$  mm olması gerektiği belirtilmiştir. Bu durumda üretilen ham çam peletlerinin hepsinin standardı sağladığı ancak gül peletlerinin bu standardı sağlayamadığı görülmektedir. Dolayısıyla gül posası atıklarının peletlenmesi için çam peletlerine kıyasla daha büyük delik (die size) açıklığına sahip pelet makinasının kullanılması gerektiği anlaşılmaktadır. Peletlerin uzunlukları incelendiğinde ise ISO 17225-1 standardına göre peletlerin uzunluklarının  $3,15\text{ mm} < L < 40\text{ mm}$  arasında olması gerekmektedir. Bu durumda üretilen tüm ham peletlerin standardı sağladığı görülmektedir. Yine aynı standarda göre parça yoğunluğunun ise  $BD600 > 600\text{ kg/m}^3$  olması gerekmektedir. Dolayısıyla üretilen tüm ham peletlerin yoğunluğunun standardı karşıladığı görülmektedir. Pelet üretiminde kullanılan katkı maddelerinin (additives) oranının ise  $< \%2$  olması ISO 17225-1 standardında verilmektedir. Dolayısıyla  $\%4$  ve  $\%6$  nişasta içeren peletler standardı bu anlamda sağlayamamaktadır.

Çizelge 4.1. Deneylerde hazırlanan ham çam kütle, çap, uzunluk, parça ve yığın yoğunluğu ölçüm sonuçları (Sonuçlar ortalama±standart sapma şeklinde verilmiştir)

| Çam Pelet              | Kütle (gr) | Çap (mm)  | Uzunluk (cm) | Parça yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) | Yığın yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|------------------------|------------|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| %45 NEM<br>%0 NİŞASTA  | 0,525±0,02 | 6,80±0,42 | 2,28±0,14    | 0,804±0,115                           | 0,308±0,00                            |
| %50 NEM<br>%0 NİŞASTA  | 0,518±0,02 | 6,6±0,51  | 2,06±0,13    | 0,938±0,169                           | 0,290±0,00                            |
| %50 NEM<br>%2 NİŞASTA  | 0,663±0,05 | 6,7±0,48  | 2,40±0,13    | 0,996±0,177                           | 0,397±0,00                            |
| %50 NEM<br>%4 NİŞASTA  | 0,631±0,07 | 6,00±0,00 | 2,62±0,12    | 1,402±0,073                           | 0,459±0,00                            |
| %50 NEM<br>%6 NİŞASTA  | 0,643±0,02 | 6,00±0,00 | 2,31±0,12    | 1,234±0,044                           | 0,364±0,00                            |
| %50 NEM<br>%10 NİŞASTA | 0,501±0,04 | 6,40±0,51 | 2,33±0,17    | 0,852±0,140                           | 0,323±0,00                            |
| %55 NEM<br>%0 NİŞASTA  | 0,620±0,05 | 7,00±0,00 | 2,4±0,15     | 0,825±0,032                           | 0,315±0,00                            |
| %55 NEM %2<br>NİŞASTA  | 0,736±0,03 | 6,60±0,51 | 2,64±0,15    | 1,037±0,168                           | 0,392±0,06                            |
| %55 NEM<br>%4 NİŞASTA  | 0,721±0,06 | 6,00±0,00 | 2,66±0,14    | 1,198±0,081                           | 0,480±0,00                            |
| %55 NEM %6<br>NİŞASTA  | 0,671±0,07 | 6,00±0,00 | 2,5±0,16     | 1,186±0,057                           | 0,471±0,00                            |
| %60 NEM %0<br>NİŞASTA  | 0,643±0,03 | 6,40±0,51 | 2,52±0,13    | 1,015±0,186                           | 0,392±0,00                            |
| %60 NEM %2<br>NİŞASTA  | 0,634±0,04 | 6,80±0,42 | 2,46±0,15    | 0,896±0,114                           | 0,295±0,00                            |
| %60 NEM %4<br>NİŞASTA  | 0,576±0,07 | 6,50±0,52 | 2,45±0,25    | 0,901±0,151                           | 0,340±0,00                            |
| %60 NEM %6<br>NİŞASTA  | 0,591±0,05 | 6,80±0,42 | 2,48±0,20    | 0,830±0,122                           | 0,332±0,00                            |

Çizelge 4.2. Deneylerde hazırlanan ham gül peletlerinin kütle, çap, uzunluk, parça ve yığın yoğunluğu ölçüm sonuçları (Sonuçlar ortalama±standart sapma şeklinde verilmiştir)

| Gül Pelet             | Kütle (gr) | Çap (mm)  | Uzunluk (cm) | Parça yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) | Yığın yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------|------------|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| %50 NEM<br>%0 NIŞASTA | 0,591±0,04 | 4,20±0,42 | 2,58±0,20    | 2,127±0,398                           | 0,536±0,00                            |
| %50 NEM<br>%2 NIŞASTA | 0,571±0,03 | 4,60±0,51 | 2,45±0,09    | 1,812±0,402                           | 0,531±0,00                            |
| %50 NEM<br>%4 NIŞASTA | 0,626±0,04 | 5,10±0,31 | 2,59±0,13    | 1,623±0,247                           | 0,459±0,00                            |
| %50 NEM<br>%6 NIŞASTA | 0,625±0,04 | 5,05±0,51 | 2,60±0,13    | 2,045±0,440                           | 0,456±0,00                            |
| %55 NEM<br>%0 NIŞASTA | 0,539±0,04 | 5,00±0,00 | 2,61±0,19    | 1,316±0,043                           | 0,478±0,00                            |
| %55 NEM<br>%2 NIŞASTA | 0,539±0,01 | 5,01±0,42 | 2,68±0,07    | 1,431±0,328                           | 0,467±0,00                            |
| %55 NEM<br>%4 NIŞASTA | 0,519±0,05 | 5,00±0,00 | 2,71±0,23    | 1,221±0,047                           | 0,395±0,00                            |
| %55 NEM<br>%6 NIŞASTA | 0,504±0,05 | 5,00±0,00 | 2,59±0,22    | 1,241±0,062                           | 0,435±0,00                            |
| %60 NEM<br>%2 NIŞASTA | 0,446±0,04 | 5,00±0,42 | 2,67±0,24    | 1,176±0,209                           | 0,393±0,00                            |
| %60 NEM<br>%4 NIŞASTA | 0,420±0,03 | 5,00±0,00 | 2,58±0,23    | 1,038±0,030                           | 0,339±0,00                            |
| %60 NEM<br>%6 NIŞASTA | 0,509±0,04 | 5,00±0,00 | 2,84±0,31    | 1,145±0,047                           | 0,371±0,00                            |

Çalışmada ayrıca peletlerin gerilme mukavemetleri de Ertest, ADCON-1 Tek Eksenli (Unconfined) Basınç Deney Seti kullanılarak ölçülmüştür (Çizelge 4.3, Çizelge 4.4.). Gerilme mukavemetleri incelendiğinde çam peletlerinin gerilme mukavemetlerinin nişasta yüzdesinin artışıyla arttığı ancak gül peletlerinde belirgin bir artışın olmadığı gözlenmektedir. Hem çam peletlerinde hem de gül peletlerinde nem oranı arttıkça peletlerin dayanımının azaldığı gözlenmektedir. Bu durumda optimum nem oranının %50 ile %55 olduğu çizelgeden anlaşılmaktadır. Optimum bağlayıcı oranına bakıldığında ise bu iki nem oranında her ne kadar çam peletlerinde nişasta oranı arttıkça dayanım artsa da bu durumun gül peletlerinde gözlenmeyişi, daha fazla bağlayıcı kullanmanın ekstra masraf olması, ortaya çıkan atıktan daha fazla miktarda faydalanarak daha yüksek kalorifik değere sahip peletler elde etmek adına ve ISO 17225-1 standardını sağlayabilmek adına %2 nişasta katkısının her iki pelet türü için optimum olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.3. Deneylerde hazırlanan ham çam peletlerinin gerilme mukavemet sonuçları

| Çam Peleti         | MPa  |
|--------------------|------|
| %45 NEM %0 NİŞASTA | 0,60 |
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 1,12 |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 1,16 |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 1,19 |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 1,53 |
| %50 NEM %10NİŞASTA | 1,44 |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 1,00 |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 1,04 |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 1,88 |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 2,63 |
| %60 NEM %0 NİŞASTA | 0,76 |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 0,93 |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 1,03 |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 1,07 |

Çizelge 4.4. Deneylerde hazırlanan ham gül peletlerinin gerilim mukavemet sonuçları

| Gül Peleti         | MPa  |
|--------------------|------|
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 1,27 |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 1,23 |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 1,29 |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 1,31 |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 1,01 |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 0,98 |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 0,99 |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 1,29 |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 0,54 |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 0,58 |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 0,59 |

#### 4.2. Farklı Nem ve Bağlayıcı Oranı Kullanılarak Hazırlanan Ham Çam ve Gül Peletlerinin Torefiye Edilmesiyle Elde Edilen Peletlerin Yakıt Özelliklerinin İncelenmesi

Deneylerde elde edilen peletler 270°C’de 1 saat bekletilerek torefikasyonları da gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da ise torefiye edilen peletlere ait kütle, çap, uzunluk, parça ve yığın yoğunluğu ölçüm sonuçları verilmiştir. ISO TS 17225-8 Bölüm 8: Isıl işlem görmüş ve yoğunlaştırılmış biyokütle yakıtları başlıklı standartta ise ağaç kökenli ve biyokütle kökenli torefiye katı yakıtlar için iki farklı tablo halinde



standart değerler verilmiştir. Bu standarda göre torefiye peletlerin çaplarının  $D06 > 6 \pm 1$  mm olması, uzunluklarının ise  $D06-D25$  peletlerde  $3,15 < L < 40$  mm arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Dolayısıyla izelge 4.7 ve 4.8 incelendiğinde torefiye am ve gl peletlerinin torefiye peletler için verilen standardı sağladığı anlaşılmaktadır. Torefiye am peletleri ve torefiye gl peletlerinin parça yoğunluklarının sırasıyla 550 ve  $600 \text{ kg/m}^3$  olması gerektiği ISO TS 17225-8’de verilmiştir. Dolayısıyla her iki pelet türünün parça yoğunluğu açısından standarda uygun olduğu görülmektedir. Katkı maddesinin torefiye am peletleri için değeri  $\leq \%4$  olarak verilirken, torefiye gl peletleri içinse standartta bir değer belirtilmemiş ve sadece katkı maddesinin ne olduğu ve miktarının belirtilmesinin yeterli olduğu ifade edilmiştir.

Çizelge 4.7 ve izelge 4.8’de ise torefiye edilen peletlerin gerilme mukavemeti sonuçları verilmiştir. Torefiye edilen peletlerde de nem oranı arttıķa (zellikle  $\%60$  nem oranında) hem gl hem de am talaşı peletlerinin dayanımlarında bir düşüş olduğu gözlenmekle birlikte, ham peletlerde olduğu gibi artan nişasta oranı ile birlikte torefiye peletlerin gerilme mukavemetleri de bir artış göstermiştir. Torefiye am peletlerinin gerilme mukavemetlerindeki düşüş  $\%6,15$  ( $\%50\text{nem} + \%6\text{nişasta}$ ) ile  $\%75,11$  ( $\%50\text{nem} + \%0\text{nişasta}$ ) arasında değişmekle birlikte ortalama  $36,24 \pm 18,49$  olarak bulunmuştur. Torefiye gl peletlerinin gerilme mukavemetlerindeki düşüş ise  $\%10,10$  ( $\%50\text{nem} + \%6\text{nişasta}$ ) ile  $\%65,29$  ( $\%50\text{nem} + \%0\text{nişasta}$ ) arasında olmakla birlikte ortalama düşüş  $\%35,56 \pm 17,42$  olarak bulunmuştur. Dolayısıyla her iki çeşit biyopeletin gerilme mukavemetlerindeki ortalama düşüşün selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriklerindeki farklılıklara rağmen oldukça benzer çıktığı görülmektedir.

Çizelge 4.5. Deneylerde torefiye edilmiş çam peletlerinin kütle, çap, uzunluk, yığın ve parça yoğunluğu ölçüm sonuçları

| Çam Pelet           | Kütle (gr) | Çap (mm)  | Uzunluk (cm) | Yığın yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) | Parça yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------------|------------|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| %45 NEM %0 NİŞASTA  | 0,368±0,03 | 5,90±0,31 | 2,06±0,21    | 0,2360±0,00                           | 0,827±0,103                           |
| %50 NEM %0 NİŞASTA  | 0,398±0,02 | 6,00±0,00 | 2,15±0,10    | 0,2525±0,00                           | 0,822±0,053                           |
| %50 NEM %2 NİŞASTA  | 0,541±0,04 | 5,70±0,48 | 2,42±0,18    | 0,3334±0,00                           | 1,116±0,188                           |
| %50 NEM %4 NİŞASTA  | 0,637±0,02 | 5,00±0,00 | 2,70±0,04    | 0,3928±0,00                           | 1,504±0,045                           |
| %50 NEM %6 NİŞASTA  | 0,455±0,02 | 5,00±0,00 | 2,35±0,15    | 0,2849±0,00                           | 1,236±0,054                           |
| %50 NEM %10 NİŞASTA | 0,456±0,06 | 5,30±0,48 | 2,5±0,30     | 0,2821±0,00                           | 1,054±0,167                           |
| %55 NEM %0 NİŞASTA  | 0,433±0,02 | 5,90±0,31 | 2,35±0,15    | 0,2627±0,00                           | 0,852±0,123                           |
| %55 NEM %2 NİŞASTA  | 0,479±0,02 | 5,70±0,48 | 2,35±0,16    | 0,3057±0,00                           | 1,021±0,185                           |
| %55 NEM %4 NİŞASTA  | 0,554±0,05 | 6,00±0,00 | 2,58±0,12    | 0,3486±0,00                           | 0,951±0,087                           |
| %55 NEM %6 NİŞASTA  | 0,492±0,03 | 5,90±0,31 | 2,44±0,18    | 0,4890±0,00                           | 0,936±0,173                           |
| %60 NEM %0 NİŞASTA  | 0,463±0,03 | 5,90±0,31 | 2,53±0,11    | 0,2758±0,00                           | 0,845±0,117                           |
| %60 NEM %2 NİŞASTA  | 0,517±0,02 | 6,00±0,47 | 2,45±0,13    | 0,2794±0,00                           | 0,950±0,158                           |
| %60 NEM %4 NİŞASTA  | 0,446±0,03 | 5,90±0,31 | 2,55±0,17    | 0,2733±0,00                           | 0,811±0,122                           |
| %60 NEM %6 NİŞASTA  | 0,475±0,02 | 5,80±0,42 | 2,50±0,15    | 0,3207±0,00                           | 0,818±0,172                           |

Gerilme mukavemeti peletleri kırmak veya parçalayabilmek için gerekli olan kuvveti ifade eder (Wang vd., 2020). Peletlerin taşınırken veya depolanırken ufalanmamaları istenmektedir. Dolayısıyla biyopeletin daha yüksek mukavemet değerleri göstermesi istenir; böylece pelet paketlenme, taşınma ve depolanma sırasında oluşabilecek ufalanmaya veya kırılmaya daha fazla dayanım gösterebilecektir. Literatürde (Wang vd., 2020) de torefikasyon ile birlikte pelet dayanımında bir azalma olduğu (%4,36 ile %25,38) bildirilmekle birlikte, bu düşüşün gerçekleştirilen çalışmadaki düşüşlerden daha az olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. Deneylerde torefiye edilmiş gül peletlerinin kütle, çap, uzunluk, yığın ve parça yoğunluğu ölçüm sonuçları

| Gül Pelet             | Kütle (gr) | Çap (mm)  | Uzunluk (cm) | Yığın yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) | Parça yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------|------------|-----------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| %50 NEM<br>%0 NIŞASTA | 0,420±0,02 | 4,20±0,42 | 2,50±0,14    | 0,3903±0,0                            | 1,555±0,277                           |
| %50 NEM<br>%2 NIŞASTA | 0,412±0,02 | 4,00±0,00 | 2,39±0,15    | 0,3836±0,0                            | 1,719±0,077                           |
| %50 NEM<br>%4 NIŞASTA | 0,479±0,03 | 4,40±0,51 | 2,67±0,18    | 0,4603±0,0                            | 1,532±0,346                           |
| %50 NEM<br>%6 NIŞASTA | 0,446±0,02 | 4,00±0,00 | 2,57±0,09    | 0,4132±0,0                            | 1,731±0,095                           |
| %55 NEM<br>%0 NIŞASTA | 0,389±0,03 | 4,10±0,31 | 2,41±0,17    | 0,3768±0,0                            | 1,551±0,206                           |
| %55 NEM<br>%2 NIŞASTA | 0,365±0,02 | 4,00±0,00 | 2,43±0,18    | 0,3373±0,0                            | 1,496±0,045                           |
| %55 NEM<br>%4 NIŞASTA | 0,359±0,02 | 4,50±0,42 | 2,47±0,15    | 0,3334±0,0                            | 1,345±0,221                           |
| %55 NEM<br>%6 NIŞASTA | 0,414±0,02 | 4,20±0,42 | 2,5±0,14     | 0,3912±0,0                            | 1,532±0,252                           |
| %60 NEM<br>%2 NIŞASTA | 0,351±0,03 | 4,10±0,31 | 2,45±0,21    | 0,3438±0,0                            | 1,374±0,154                           |
| %60 NEM<br>%4 NIŞASTA | 0,305±0,01 | 4,60±0,51 | 2,42±0,12    | 0,3256±0,0                            | 0,986±0,236                           |
| %60 NEM<br>%6 NIŞASTA | 0,308±0,01 | 4,30±0,48 | 2,44±0,14    | 0,2933±0,0                            | 1,121±0,209                           |

Çizelge 4.7. Torefiye edilen çam peletlerinin gerilme mukavemeti sonuçları

| Çam Peleti         | MPa  |
|--------------------|------|
| %45 NEM %0 NİŞASTA | 0,26 |
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 0,30 |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 0,83 |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 1,09 |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 1,21 |
| %50 NEM%10NİŞASTA  | 1,10 |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 0,46 |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 0,89 |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 1,21 |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 1,90 |
| %60 NEM %0 NİŞASTA | 0,45 |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 0,46 |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 0,62 |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 0,67 |

Çizelge 4.8. Torefiye edilen gül peletlerinin gerilme mukavemeti sonuçları

| Gül Peleti         | MPa  |
|--------------------|------|
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 0,54 |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 0,75 |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 0,83 |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 1,18 |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 0,56 |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 0,59 |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 0,53 |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 0,75 |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 0,46 |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 0,40 |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 0,44 |

#### 4.3. Deneylerde Elde Edilen Ham ve Torefiye Haldeki Çam ve Gül Peletlerinin Yaklaşık Analiz Sonuçları

Deneylerde elde edilen peletlerin ayrıca ham ve torefiye hallerinin yaklaşık analizleri de gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10’da torefiye ve Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de ham peletlerin yaklaşık analiz sonuçları verilmiştir.

Torefikasyon prosesi, ham biyokütleden daha düşük nem ve daha yüksek enerji içeriğine sahip tek tip katı bir ürün oluşturur. Torefikasyon sırasında, biyokütledeki

nem ve bazı uçucu organik bileşikler uçucu hale gelir (Tumuluru vd., 2021). Bu çalışmada da benzer şekilde, genel olarak torefiye olan peletlerin kül içerikleri, sabit karbon içerikleri ve üst ısı değerleri ham hallerine kıyasla artış göstermiştir. Bununla beraber genel olarak nem ve uçucu madde içerikleri ise azalış göstermiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda da torefikasyon işlemi ile biyokütlenin uçucu içeriğinin azaldığı buna karşın sabit karbon içeriğinin arttığı belirtilmektedir (Lu vd., 2016; Botelho vd., 2018).

Torefikasyon, biyokütlenin fiziksel özelliklerini, kimyasal bileşimini ve enerji ve depolama özelliklerini iyileştirir. Torefiye malzeme, yaklaşık %1-3 yaş bazda (w.b.) bir nem içeriğine sahiptir (Tumuluru vd., 2021). Bu çalışmada da ham çam peletlerinin nem içeriği %45, %50, %55 ve %60 için sırasıyla %3,90; %9,22±1,93; %10,38±1,66 ve %9,50±0,26 olarak bulunmuştur. Torefiye çam peletleri içinse %45, %50, %55 ve %60 nem oranlarında peletlerin nem içerikleri sırasıyla %0,92; %0,894±0,32; %0,855±0,37 ve %0,957±0,015 olarak bulunmuştur. Benzer şekilde ham gül peletlerinin başlangıç %50, %55 ve %60 nem değerleri için hesaplanan nem içerikleri sırasıyla %8,92±0,28; %9,18±1,18 ve %9,44±1,98 olarak bulunmuştur. Torefiye gül peletlerinin başlangıç %50, %55 ve %60 nem değerleri için hesaplanan nem içerikleri sırasıyla %0,33±0,35; %0,43±0,19 ve %0,38±0,28 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla çalışmada kullanılan başlangıç nem içeriği ile peletin nihai nem içeriği ile arasında istatistiki olarak anlamlı bir fark ( $p>0,05$ ) hem ham hem de torefiye biyo-peletlerde bulunamamıştır.

Biyokütlenin 300°C'de torefikasyonu, ham biyokütle ile karşılaştırıldığında enerji içeriğini yaklaşık %30 arttırır. Örneğin, yakıldığında, biyokütlenin kalorifik değeri yaklaşık 18–19 MJ/kg'dan yaklaşık 20–24 MJ/kg'a kadar yükselir. Çünkü, torefikasyon sırasındaki buharlaşma (devolatilizasyon) ve karbonizasyon reaksiyonları, biyokütlenin yaklaşık ve nihai bileşimini değiştirir. Biyokütlenin hidrojen, oksijen ve azot içeriği azalırken karbon içeriği artar (Tumuluru vd., 2021). Ham biyokütlerdeki O-H ve C-O bağlarından daha fazla enerji salma kabiliyetine sahip daha fazla C-C ve C-H bağına sahip olduğundan dolayı torefiye biyokütlenin ısı değeri daha yüksektir. Bu durum, Van Krevelen diyagramında torefiye biyokütleyi kömür tarafına doğru hareket ettirir (Nhuchhen vd., 2014).

Dolayısıyla torefikasyon sonucunda bu çalışmada da, peletlerin sabit karbon içeriğindeki artışa paralel olarak ham çam peletlerinin kalorifik değeri torefikasyon ile 17,51-18,80 MJ/kg'dan 20,20-21,73 MJ/kg'a, ham gül peletlerinin kalorifik değeri de 17,42-18,54 MJ/kg'dan 19,13-20,92 MJ/kg'a yükselmiştir. Bu çalışmada muhtemelen 300°C'den daha düşük sıcaklıkta (270 °C) torefikasyon gerçekleştirildiği için gül peletlerinde %15'e varan, çam peletlerinde ise %23'e varan oranda biyo-peletin enerji içeriği arttırılmıştır.

ISO 17225-1 standardında, endüstriyel kullanım için hazırlanan odunsu peletlerin nem ve kül miktarı odun işleme endüstrisinden gelen atıklar kategorisinde (I3) sırasıyla  $M_{10} \leq 10\%$  ve  $A_{3,0} \leq 3,0\%$  olarak verilmiştir. Dolayısıyla çalışmada üretilen ham çam ve gül peletlerinin nem içeriği ile olan kısıtlamayı sağladığı görülmektedir (Çizelge 4.10 ve 4.11). Ancak ham çam peletlerinin kül kısıtını sağlamasına rağmen, ham gül peletlerinin kül oranının standartta verilen limit değer'den yaklaşık 3-4 kat büyük olduğu görülmektedir (Çizelge 4.12).

ISO 17225-8;2016 torefiye pelet standardında tarımsal atıklar için ayrı bir başlık verilmiştir, dolayısıyla tarımsal atıkların kül içerik miktarı TA1 başlığı altında nem içeriği ve kül içeriği sırasıyla  $M_{10} \leq 10\%$  ve  $A_{5,0} \leq 5,0\%$  olarak verilmiştir. Torefiye gül peletleri TA1 başlığındaki standart değerden yüksek bulunmasına rağmen TA2 otsu biyokütle sınıfındaki  $A_{10} \leq 10\%$  standart değerini genel olarak sağladığı görülmektedir (Çizelge 4.10). Hazırlanan torefiye çam peletleri ise yine torefiye odunsu biyokütle tablosunda TW3L başlığı altında  $M_{10} \leq 10\%$  ve  $A_{5,0} \leq 5,0\%$  değerlerini sağlamaktadır (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Deneylerde hazırlanan torefiye çam peletlerinin yaklaşık analiz sonuçları

| Çam Peleti          | Nem (%)<br>@ 105°C | Uçucu madde<br>(%)<br>@ 925 °C | Sabit karbon<br>(%)<br>@ 800 °C | Kül<br>(%) | HHV<br>(MJ/kg) |
|---------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------|----------------|
| %45 NEM %0 NİŞASTA  | 0,92               | 81,01                          | 16,74                           | 1,33       | 20,86          |
| %50 NEM %0 NİŞASTA  | 1,37               | 80,24                          | 16,73                           | 1,66       | 20,71          |
| %50 NEM %2 NİŞASTA  | 0,86               | 77,09                          | 20,98                           | 1,08       | 21,63          |
| %50 NEM %4 NİŞASTA  | 0,55               | 77,74                          | 18,95                           | 2,76       | 21,03          |
| %50 NEM %6 NİŞASTA  | 1,02               | 75,81                          | 17,60                           | 1,57       | 20,20          |
| %50 NEM %10 NİŞASTA | 0,67               | 78,11                          | 20,07                           | 1,15       | 21,49          |
| %55 NEM %0 NİŞASTA  | 0,35               | 77,22                          | 21,21                           | 1,22       | 21,73          |
| %55 NEM %2 NİŞASTA  | 1,24               | 75,65                          | 21,89                           | 1,22       | 21,68          |
| %55 NEM %4 NİŞASTA  | 0,81               | 77,91                          | 20,33                           | 0,95       | 21,55          |
| %55 NEM %6 NİŞASTA  | 1,02               | 76,41                          | 20,70                           | 1,88       | 21,40          |
| %60 NEM %0 NİŞASTA  | 0,94               | 75,94                          | 21,59                           | 1,13       | 21,63          |
| %60 NEM %2 NİŞASTA  | 0,97               | 79,28                          | 18,26                           | 1,49       | 21,07          |
| %60 NEM %4 NİŞASTA  | 0,95               | 75,60                          | 20,99                           | 2,06       | 21,35          |
| %60 NEM %6 NİŞASTA  | 0,97               | 78,93                          | 19,25                           | 0,85       | 21,36          |

Çizelge 4.10. Deneylerde hazırlanan torefiye gül peletlerinin yaklaşık analiz sonuçları

| Gül Peleti         | Nem (%)<br>@ 105°C | Uçucu madde<br>(%)<br>@ 925°C | Sabit karbon<br>(%)<br>@ 800°C | Kül<br>(%) | HHV<br>(MJ/kg) |
|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------|----------------|
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 0,05               | 65,86                         | 24,55                          | 9,54       | 20,81          |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 0,76               | 65,20                         | 24,6                           | 9,44       | 20,71          |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 0,03               | 65,18                         | 25,2                           | 9,59       | 20,92          |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 0,48               | 64,17                         | 25,48                          | 9,87       | 20,83          |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 0,37               | 65,06                         | 22,42                          | 12,14      | 19,91          |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 0,51               | 65,72                         | 22,82                          | 10,96      | 20,18          |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 0,25               | 66,20                         | 22,57                          | 10,97      | 20,18          |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 0,70               | 67,82                         | 18,74                          | 11,74      | 19,13          |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 0,55               | 65,3                          | 23,08                          | 10,57      | 20,19          |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 0,55               | 65,92                         | 21,14                          | 12,40      | 19,62          |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 0,06               | 65,17                         | 22,61                          | 12,16      | 20,00          |

Çizelge 4.11. Deneylerde hazırlanan ham çam peletlerinin yaklaşık analiz sonuçları

| Çam Peleti         | Nem (%)<br>@ 105 °C | Uçucu<br>madde (%)<br>@ 925 °C | Sabit<br>karbon (%)<br>@ 800 °C | Kül (%) | HHV<br>(MJ/kg) |
|--------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------|----------------|
| %45 NEM %0 NİŞASTA | 3,90                | 82,68                          | 7,14                            | 6,27    | 17,78          |
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 6,92                | 83,58                          | 7,48                            | 2,03    | 18,07          |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 10,56               | 77,50                          | 10,75                           | 1,18    | 18,10          |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 9,18                | 76,46                          | 12,29                           | 2,07    | 18,45          |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 11,62               | 76,38                          | 9,82                            | 2,19    | 17,56          |
| %50 NEM%10NİŞASTA  | 7,80                | 80,05                          | 8,71                            | 3,44    | 17,85          |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 10,04               | 77,17                          | 11,12                           | 1,67    | 17,81          |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 10,13               | 79,01                          | 10,10                           | 0,75    | 18,15          |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 10,80               | 77,51                          | 10,97                           | 0,72    | 18,18          |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 10,53               | 77,59                          | 11,29                           | 0,71    | 17,75          |
| %60 NEM %0 NİŞASTA | 9,56                | 75,28                          | 10,26                           | 4,90    | 17,51          |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 9,85                | 81,40                          | 8,17                            | 0,58    | 17,91          |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 9,28                | 77,98                          | 11,19                           | 1,55    | 18,34          |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 9,29                | 76,57                          | 13,23                           | 0,91    | 18,80          |

Çizelge 4.12. Deneylerde kullanılan ham gül peletlerinin yaklaşık analiz sonuçları

| Gül Peleti         | Nem (%)<br>@ 105 °C | Uçucu<br>madde (%)<br>@ 925 °C | Sabit<br>karbon (%)<br>@ 800 °C | Kül (%) | HHV<br>(Mj/kg) |
|--------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------|----------------|
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 8,51                | 67,05                          | 17,49                           | 6,96    | 18,54          |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 8,94                | 66,16                          | 17,53                           | 7,38    | 18,39          |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 9,14                | 68,74                          | 15,76                           | 6,36    | 18,24          |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 9,10                | 68,06                          | 16,05                           | 6,89    | 18,22          |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 8,61                | 65,32                          | 18,36                           | 7,71    | 18,53          |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 9,18                | 68,74                          | 14,09                           | 7,99    | 17,66          |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 8,10                | 69,39                          | 15,20                           | 7,40    | 18,17          |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 10,83               | 66,61                          | 15,57                           | 7,00    | 17,78          |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 7,38                | 65,84                          | 19,31                           | 7,47    | 18,96          |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 8,32                | 65,91                          | 18,20                           | 7,57    | 18,58          |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 12,63               | 65,04                          | 15,35                           | 6,98    | 17,42          |

#### 4.4. Deneylerde Elde Edilen Torefiye Gül ve Çam Peletlerinin Kütle Verimleri, Enerji Verimleri ve Enerji Yoğunluk Oranları

Deneylerde basılan çam ve gül peletlerinin kütle, enerji verim ve enerji yoğunluk oranları da bu çalışmada hesaplanmıştır (Çizelge 4.13, Çizelge 4.14.). Torefikasyon işleminin son ürünleri, katı kömür ve gazlı yakıtlardır. İşlem sadece biyokütle içerisindeki oksijenin seviyesini düşürmeye yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda



kömür matrisi içindeki karbon içeriğini de arttırır. Bu işlem sırasında toplam kütle veriminin literatürde yaklaşık %50 ila %97 arasında değiştiği görülmektedir (Felfli vd., 2005; Reza ve Lynam, 2013; Dutta ve Lion, 2021). Yüksek sıcaklık, hem kütle hem de enerji veriminde önemli bir azalmaya neden olurken enerji yoğunluğunda ise bir artışa neden olmaktadır (Yan vd., 2009).

Torefikasyon işleminde, kütle kaybının temelde sorumlusu biyokütlenin hemiselüloz içeriğidir (Bridgemen vd., 2008). Çünkü, biyokütlerde bulunan hemiselüloz, torefikasyon işlemi sırasında depolimerize olur ve daha düşük enerji değerlerine sahip uçucu bileşenleri serbest bırakır. Dolayısıyla, torefikasyon sonrası elde edilen katı madde her zaman yüksek enerji yoğunluğu değerlerine sahiptir (Basu vd., 2014). Enerji yoğunluğunun 1'in üstünde olması birim kütle başına bir enerji kazancının olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla enerji yoğunluğunun 1'in üstünde olduğu peletler o pelet karışımı için torefikasyon işleminin peletin net kullanılabilir enerjisini arttırdığı anlamına gelir ve istenilen bir durumdur (Çetinkaya, 2021).

Bu çalışmada da literatürle benzer şekilde; çam peletlerinin, %45, %50, %55 ve %60 nem oranında hesaplanan enerji yoğunluk oranları artış göstermiş ve %0 nişasta katkısı için sırasıyla bir'den büyük 1,04, 1,08, 1,14 ve 1,12 olarak bulunmuştur. Aynı nem oranı ve farklı nişasta katkıları için torefiye çam peletlerinin enerji yoğunluk oranları incelendiğinde; %50, %55 ve %60 nem oranları için ortalama enerji yoğunlukları sırasıyla  $1,12 \pm 0,03$ ,  $1,14 \pm 8,16$  ve  $1,14 \pm 0,01$  olarak bulunmuştur. Dolayısıyla farklı nem içerikleri için istatistiksel olarak aralarında anlamlı bir fark bulunmamıştır ( $p > 0,05$ ). Benzer şekilde torefiye gül peletlerinin %50, %55 ve %60 nem için %0 nişasta katkısında enerji yoğunluk oranları sırasıyla 1,0, 0,89 ve 0,98 olarak bulunmuştur. Aynı nem oranı ve farklı nişasta katkıları için torefiye gül peletlerinin enerji yoğunluk oranları incelendiğinde ise; %50, %55 ve %60 nem oranları için ortalama enerji yoğunlukları sırasıyla  $1,01 \pm 0,01$ ,  $0,93 \pm 0,03$  ve  $0,99 \pm 0,01$  bulunmuştur. Yani çam peletlerinde olduğu gibi gül peletleri için de nem oranı ile enerji yoğunluğu arasında istatistiksel olarak anlamlı bir değişim bulunamamıştır ( $p > 0,05$ ). Buna karşın enerji yoğunluk oranları genel olarak artan nişasta içeriğiyle birlikte hem gül peletlerinde (tüm nem oranları için,  $p < 0,05$ ) hem çam numunelerinde (%60 nem için,  $p < 0,05$ ) bir artış göstermiştir.

Biyokütlelerin torefikasyon işlemi ile enerji yoğunluklarının yaklaşık %90'nını korudukları belirtilmektedir (Dutta ve Mathias, 2021). Bununla birlikte biyokütlelerin enerji veriminin içeriğine bağlı olduğu yine literatürden anlaşılmaktadır. Enerji verimini arttıran en önemli içeriğin lignin olduğu yine literatürde vurgulanmaktadır. Torefiye çam peletlerinin enerji verimleri %45, %50, %55 ve %60 nem oranında sırasıyla; 0,77; 0,83±0,04; 0,81±0,01 ve 0,81±0,05 olarak bulunmuştur. Torefiye gül peletlerinin enerji verimi ise %50, %55 ve %60 nem oranında sırasıyla; 0,75±0,01; 0,63±0,01 ve 0,71±0,01 olarak bulunmuştur. Tıpkı enerji verimlerinde olduğu gibi, torefiye çam ve gül peletlerinin farklı nem oranı oranları ile enerji yoğunlukları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir değişim bulunamamıştır ( $p>0,05$ ). Ancak numunedeki nişasta oranına bağlı olarak hem çam hem de gül peletlerinin artan katkı oranıyla birlikte enerji verimleri de istatistiki olarak anlamlı ( $p<0,05$ ) bir artış göstermiştir. Literatürde *Adansonia digitata*'nın enerji verimi farklı torefikasyon sıcaklıkları için %70,74 ile %74,96 arasında değişmiştir (Chowdhury vd., 2017). Phanphanich ve Mani (2011) odunsu biyokütlenin (çam yongaları ve tomruk artıkları, torefikasyon sıcaklığı 225/250/275/300°C, bekleme süresi 0,5 saat) kütle verimi, enerji verimi ve enerji yoğunluğunun sırasıyla 52%–89%, 71%–94% ve 1,05%–1,39% aralığında olduğunu bildirmiştir. Pimchuai vd. (2010) tarımsal artıkların (pirinç kabuğu, yer fıstığı kabuğu, küspe ve su sümbülü, 250/270/300°C torefikasyon sıcaklığı, 1/1,5/2 saat bekleme süresi) kütle verimi, enerji verimi ve enerji yoğunluğunun sırasıyla %41-79, %55-98 ve 1,08-1,66 aralığında olduğunu çalışmasında belirtmiştir. Nispeten daha yüksek uçucu içeriği ve hemiselüloz nedeniyle tarımsal artıkların daha yüksek kütle kaybı ve enerji yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir (Chen vd., 2011). Biyokütlenin kütlelerinin kaybındaki artışla (düşük katı verimi), HHV ve enerji yoğunluğu artarken enerji verimi azalır. Torefikasyon işleminde, artan ısı işlem sıcaklığı ve bekleme süresi ile, ham biyokütlerde depolanan enerjiyi azaltan uçucuların verimleri artar, bu da geriye kalan katı maddenin enerji veriminin azalmasına neden olur. Artan karbon içeriği ve azalan hidrojen ve oksijen içeriği, HHV'nin artmasına neden olur çünkü C–C bağında bulunan enerji, C–H veya C–O bağlarından daha yüksektir (Phanphanich ve Mani, 2011). Öte yandan, enerjinin azalması, kütlelerin azalmasından daha düşüktür, bu da artan enerji yoğunluğu ve HHV ile sonuçlanır. Bu çalışmada da kütle verimi de peletlerin nem oranıyla anlamlı bir şekilde değişmemiş ve torefiye çam peletlerinin kütle verimleri %45, %50, %55 ve %60 nem oranları için sırasıyla; 0,74; 0,74±0,05; 0,71±0,01 ve

0,71±0,04 olarak bulunmuştur. Torefiye gül peletlerinin kütle verimleri de benzer şekilde %50, %55 ve %60 nem oranları için sırasıyla; 0,73±0,01; 0,68±0,005 ve 0,71±0,01 olarak bulunmuştur. Çalışmada ayrıca hem ham hem de torefiye numunelerin kütle verimi ile enerji verimi ve enerji yoğunluğu arasındaki korelasyon da incelenmiştir. Çam peletlerinde kütle verimi ile enerji verimi arasında anlamlı ( $p<0,05$ ;  $R^2=0,665$ ) bir ilişki bulunurken, kütle verimi ile enerji yoğunluğu arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır ( $p>0,05$ ;  $R^2=0,025$ ). Gül peletlerinin ise hem kütle verimi ile enerji verimi arasında anlamlı ( $p<0,05$ ;  $R^2=0,797$ ) hem de kütle verimi ile enerji yoğunluğu arasında anlamlı bir ilişki bulunmuştur ( $p<0,05$ ;  $R^2=0,548$ ). Literatürde de kütle veriminin, enerji verimi veya enerji yoğunluğundan bağımsız olarak, ham biyokütle tipine, torefikasyon sıcaklığına, bekleme süresine ve reaktör tipine vb. bağlı olduğu görülmektedir (Niu vd., 2019).

Çizelge 4.13. Torefiye edilen çam peletlerinin kütle verimi, enerji verimi ve enerji yoğunluk oranları

| Çam Peletleri       | Kütle verimi | Enerji verimi | Enerji yoğunluk Oranı |
|---------------------|--------------|---------------|-----------------------|
| %45 NEM %0 NİŞASTA  | 0,74         | 0,77          | 1,04                  |
| %50 NEM %0 NİŞASTA  | 0,75         | 0,81          | 1,08                  |
| %50 NEM %2 NİŞASTA  | 0,79         | 0,89          | 1,13                  |
| %50 NEM %4 NİŞASTA  | 0,71         | 0,81          | 1,14                  |
| %50 NEM %6 NİŞASTA  | 0,67         | 0,78          | 1,16                  |
| %50 NEM %10 NİŞASTA | 0,78         | 0,85          | 1,09                  |
| %55 NEM %0 NİŞASTA  | 0,69         | 0,79          | 1,14                  |
| %55 NEM %2 NİŞASTA  | 0,71         | 0,80          | 1,14                  |
| %55 NEM %4 NİŞASTA  | 0,71         | 0,81          | 1,13                  |
| %55 NEM %6 NİŞASTA  | 0,71         | 0,83          | 1,15                  |
| %60 NEM %0 NİŞASTA  | 0,77         | 0,87          | 1,12                  |
| %60 NEM %2 NİŞASTA  | 0,66         | 0,75          | 1,14                  |
| %60 NEM %4 NİŞASTA  | 0,70         | 0,81          | 1,15                  |
| %60 NEM %6 NİŞASTA  | 0,71         | 0,81          | 1,15                  |

Çizelge 4.14. Torefiye edilen gül peletlerinin kütle verimi, enerji verimi ve enerji yoğunluk oranları

| Gül Peletleri      | Kütle verimi | Enerji verimi | Enerji yoğunluk Oranı |
|--------------------|--------------|---------------|-----------------------|
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 0,75         | 0,75          | 1,00                  |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 0,72         | 0,76          | 1,01                  |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 0,71         | 0,73          | 1,03                  |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 0,73         | 0,75          | 1,02                  |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 0,68         | 0,61          | 0,89                  |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 0,68         | 0,64          | 0,94                  |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 0,68         | 0,64          | 0,94                  |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 0,67         | 0,65          | 0,96                  |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 0,70         | 0,69          | 0,98                  |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 0,73         | 0,72          | 1,00                  |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 0,71         | 0,72          | 1,01                  |

#### 4.5. Deneylerde Elde Edilen Torefiye Gül ve Torefiye Çam Peletlerinin Kırılma Direncinin İncelenmesi

Torefikasyondan sonra, biyokütle partikülleri arasındaki lifler kırılır ve partiküller daha kısa ve küresel hale gelir, bu da biyokütlenin akışkanlığını iyileştirir (Arias vd., 2008; Wang vd., 2011; Ciolkosz ve Wallace, 2011). Torefiye olmuş biyokütle bu nedenle kırılmandır, bu da daha düşük enerji tüketimi ile öğütülebilirliğini geliştirir ve daha küçük partikül boyutu dağılımı ile sonuçlanır (Deng vd., 2009; Repellin vd., 2010; Phanphanich ve Mani, 2011; Wang vd., 2011). Genel olarak, biyokütlenin öğütülmesi için gereken enerji, öğütülmüş ana biyokütlenin sadece %10-20'sidir ve kömürünkiyle karşılaştırılabilir düzeydedir (Bergman vd., 2005; Ciolkosz ve Wallace, 2011; Phanphanich ve Mani, 2011). Sonuç olarak; torefikasyon, biyokütlenin akışkanlığını ve öğütülebilirliğini önemli ölçüde iyileştirir.

Bu çalışmada da peletlerin kırılma direncini hesaplayabilmek adına hazırlanan peletler içerisinden rastgele seçilen 10 adet pelet önce tartılmış daha sonra 1,85 metre yükseklikten sert zemine 4 kez düşürülmüştür. 4 kez düşürüldükten sonra peletler 3,15 mm çaplı elek ile elenmiş ve tartılmışlardır. Test öncesi ve test sonrası gerçekleştirilen ağırlık ölçümlerinden ise % ağırlık kayıpları hem ham hem de torefiye edilmiş peletler için hesaplanmıştır (Çizelge 4.15, Çizelge 4.16, Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18.). Ham çam peletlerinin % kayıpları %45, %50, %55 ve %60 nem oranları için ortalama

%0,08; %0,12±0,03; %0,07±0,03 ve %0,12±0,07 olarak bulunmuştur. Ham gül peletlerinin % kayıpları ise %50, %55 ve %60 nem oranları için ortalama 0,02±0,01; 0,02±0,01 ve 0,05±0,01 olarak bulunmuştur. Yani aynı nem oranlarında ham çam peletleri 2,4 - 6 kat arasında değişen oranlarda ham gül peletlerine kıyasla daha fazla kırılmaya ve ufalanmaya yatkın bulunmuştur. Torefiye çam peletlerinin % kayıpları %45, %50, %55 ve %60 nem oranları için ortalama %0,30; %0,26±0,01; %0,33±0,07 ve %0,24±0,03 olarak bulunmuştur. Torefiye gül peletlerinin % kayıpları ise %50, %55 ve %60 nem oranları için ortalama 0,24±0,05; 0,22±0,05 ve 0,32±0,05 olarak bulunmuştur. Yani torefiye gül ve çam peletlerinin arasında ham haldekilerine kıyasla büyük bir kırılma ve ufalanma farkı oluşmamıştır. Sonuçlardan görüldüğü üzere; farklı nem oranlarının hem ham hem de torefiye peletlerde kırılma direnci üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamıştır. Ancak, nem içeriklerinin birbirine yakın olmasından dolayı kırılma direnci ile nem oranı arasında istatistiksel olarak anlamlı bir değişimin oluşmadığı ihtimali de bulunmaktadır. Diğer önemli bir sonuç; torefikasyon işleminin peletlerin kırılma ve ufalanma miktarlarını arttırmış olmasıdır. Torefiye çam peletleri ham çam peletlerine kıyasla 2-4,7 kat daha fazla kırılğan bulunurken, torefiye gül peletleri ham gül peletlerine kıyasla 6,4-12 kat daha fazla kırılğan bulunmuştur. Bu çalışmada, torefiye gül ve torefiye çam peletlerinin gerilme mukavemetlerindeki düşüş benzer çıksa da gül peletlerinin torefikasyon sonucunda çama kıyasla daha fazla kırılğan ve ufalanmaya meyilli olduğu görülmektedir. Yine de elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu ve ham çam, ham gül, torefiye çam ve torefiye gül peletlerinin ortalama olarak sırasıyla %99,89, %99,96, %99,72 ve %99,74 oranında bütünlüklerini korudukları görülmektedir (Sah vd., 1980; Khankari vd., 1989; Shrivastava vd., 1989; Yılmaz, 2014). Bu çalışmada her ne kadar mekanik dayanımları incelenmemiş olsa da ISO 17225-1 standardında üretilen ham peletlerin dayanımlarının  $DU_{96,5} \geq 96,5$  % olması istenmektedir. ISO/TS 17225-8'de de torefiye tarımsal biyokütle için de TA1 sınıfı altında torefiye peletlerin dayanımı  $DU_{97,5} \geq 97,5$  % olarak verilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada hem ham hem de torefiye peletlerin kırılma dirençleri göz önüne alındığında Çetinkaya'nın (2021) peletler ile yaptığı çalışmada elde edilen kırılma direnci ve dayanımlar arasındaki yüksek paralellik göz önüne alındığında üretilen tüm peletlerin dayanım açısından standardı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 4.15. Ham çam peletlerinin kırılma direnci

| Çam Peleti          | % Kayıp   |
|---------------------|-----------|
| %45 NEM %0 NİŞASTA  | 0,08±0,04 |
| %50 NEM %0 NİŞASTA  | 0,08±0,03 |
| %50 NEM %2 NİŞASTA  | 0,13±0,08 |
| %50 NEM %4 NİŞASTA  | 0,13±0,17 |
| %50 NEM %6 NİŞASTA  | 0,08±0,07 |
| %50 NEM %10 NİŞASTA | 0,17±0,32 |
| %55 NEM %0 NİŞASTA  | 0,08±0,07 |
| %55 NEM %2 NİŞASTA  | 0,11±0,18 |
| %55 NEM %4 NİŞASTA  | 0,04±0,03 |
| %55 NEM %6 NİŞASTA  | 0,04±0,05 |
| %60 NEM %0 NİŞASTA  | 0,12±0,03 |
| %60 NEM %2 NİŞASTA  | 0,10±0,08 |
| %60 NEM %4 NİŞASTA  | 0,11±2,80 |
| %60 NEM %6 NİŞASTA  | 0,14±0,03 |

Çizelge 4.16. Ham gül peletlerinin kırılma direnci

| Gül Peleti         | % Kayıp   |
|--------------------|-----------|
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 0,01±0,02 |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 0,03±0,03 |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 0,04±0,01 |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 0,02±0,03 |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 0,01±0,08 |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 0,04±0,03 |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 0,02±0,02 |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 0,03±0,03 |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 0,06±0,04 |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 0,07±0,48 |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 0,04±0,02 |

Çizelge 4.17. Torefiye çam peletlerinin kırılma direnci

| Çam Peleti          | % Kayıp   |
|---------------------|-----------|
| %45 NEM %0 NİŞASTA  | 0,30±0,05 |
| %50 NEM %0 NİŞASTA  | 0,25±0,20 |
| %50 NEM %2 NİŞASTA  | 0,26±0,16 |
| %50 NEM %4 NİŞASTA  | 0,24±0,01 |
| %50 NEM %6 NİŞASTA  | 0,26±0,02 |
| %50 NEM %10 NİŞASTA | 0,29±0,01 |
| %55 NEM %0 NİŞASTA  | 0,38±0,33 |
| %55 NEM %2 NİŞASTA  | 0,38±0,01 |
| %55 NEM %4 NİŞASTA  | 0,36±0,35 |
| %55 NEM %6 NİŞASTA  | 0,22±0,19 |
| %60 NEM %0 NİŞASTA  | 0,24±0,02 |
| %60 NEM %2 NİŞASTA  | 0,20±0,04 |
| %60 NEM %4 NİŞASTA  | 0,28±0,01 |
| %60 NEM %6 NİŞASTA  | 0,23±0,07 |

Çizelge 4.18. Torefiye gül peletlerinin kırılma direnci

| Gül Peleti         | % Kayıp   |
|--------------------|-----------|
| %50 NEM %0 NİŞASTA | 0,29±0,12 |
| %50 NEM %2 NİŞASTA | 0,27±0,11 |
| %50 NEM %4 NİŞASTA | 0,25±0,11 |
| %50 NEM %6 NİŞASTA | 0,17±0,13 |
| %55 NEM %0 NİŞASTA | 0,28±0,01 |
| %55 NEM %2 NİŞASTA | 0,19±0,09 |
| %55 NEM %4 NİŞASTA | 0,21±0,06 |
| %55 NEM %6 NİŞASTA | 0,20±0,06 |
| %60 NEM %2 NİŞASTA | 0,32±0,14 |
| %60 NEM %4 NİŞASTA | 0,37±0,15 |
| %60 NEM %6 NİŞASTA | 0,27±0,49 |

#### 4.6. Hazırlanan Peletlerin Nem Alma Direnci

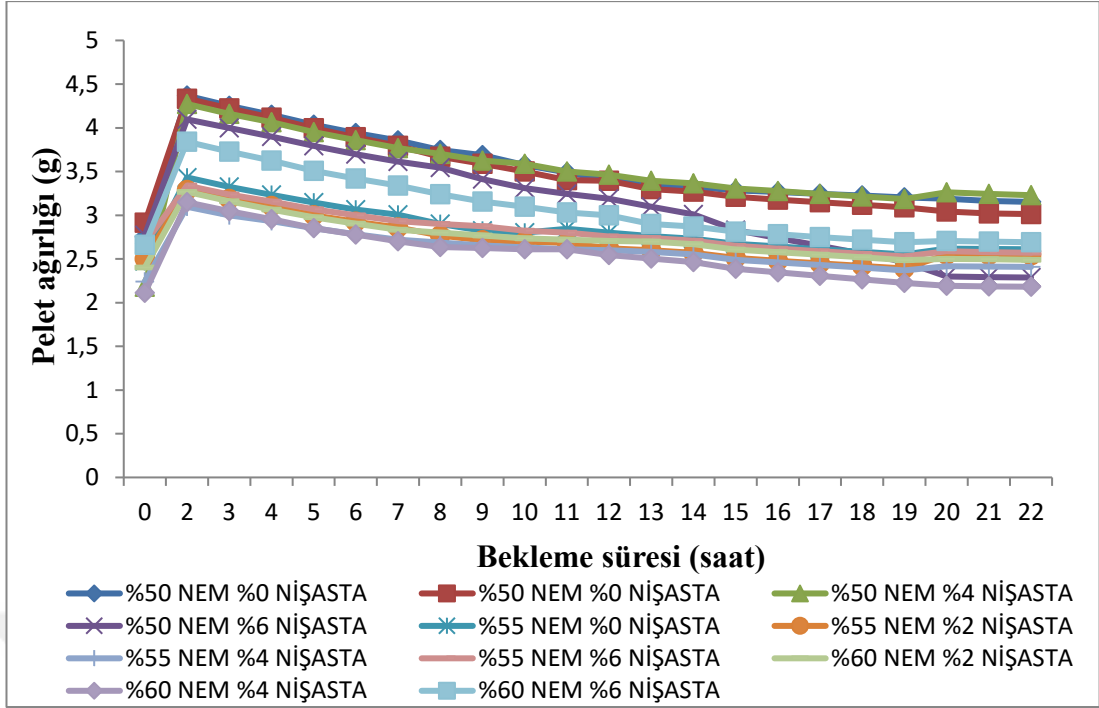
Biyopeletlerin depolanmasındaki en büyük sorun peletlerin re-absorbisyon ile nemi çekmeleri ve bunun sonucunda oluşan mikrobiyolojik bozunmadır (Duncan vd., 2013). Dolayısıyla literatürde de vurgulandığı üzere torefikasyon işlemi biyokütlenin içerisinde yer alan hidroksil gruplarını elimine edeceği ve yapının yeni hidrojen bağı kurma potansiyelini düşüreceğinden dolayı, biyokütlenin hidrofilik yapısını hidrofobik yapıya dönüştürebilmektedir (Nhuchhen vd., 2014). Bu çalışmada da hazırlanan ham ve torefiye peletlerin nem alma dirençleri ölçülerek torefikasyon işleminin peletlerin re-absorbisyon yolu ile nem çekme davranışlarına olan etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla hazırlanan peletler suda oda sıcaklığında iki saat bekletildikten sonra, sudan çıkarılmış ve saat başı sabit tartıma gelene kadar tartılmışlardır. Şekil 4.1 – Şekil 4.4 incelendiğinde, genel olarak ham olarak basılan peletlerin sabit tartıma gelmelerinin torefiye olanlara kıyasla daha uzun sürdüğü yani torefiye olan peletlerin nem alma konusunda ham peletlere kıyasla daha kararlı olduğu; ham çam, ham gül, torefiye çam ve torefiye gül peletlerinin nem alma dirençleri incelendiğinde ise sırasıyla sabit tartıma ulaşma sürelerinin yaklaşık olarak 21, 20, 10 ve 9 saat olduğu görülmüştür.

Ham gül peletlerinin 2 saatin sonunda kütleleri %19,53 (%50nem+%0 nişasta) ile %44,36'lük (%60nem+%6 nişasta) bir artış göstermiştir. Ham çam peletlerinin kütleleri ise 2 saatin sonunda %57,19 (%60nem+%6nişasta) ila %198,36 (%55nem+%4nişasta) arasında bir artış göstermiştir. Buna karşın torefiye gülün 2 saatin sonunda nem çekme miktarının farklı pelet karışımları için 13,72%

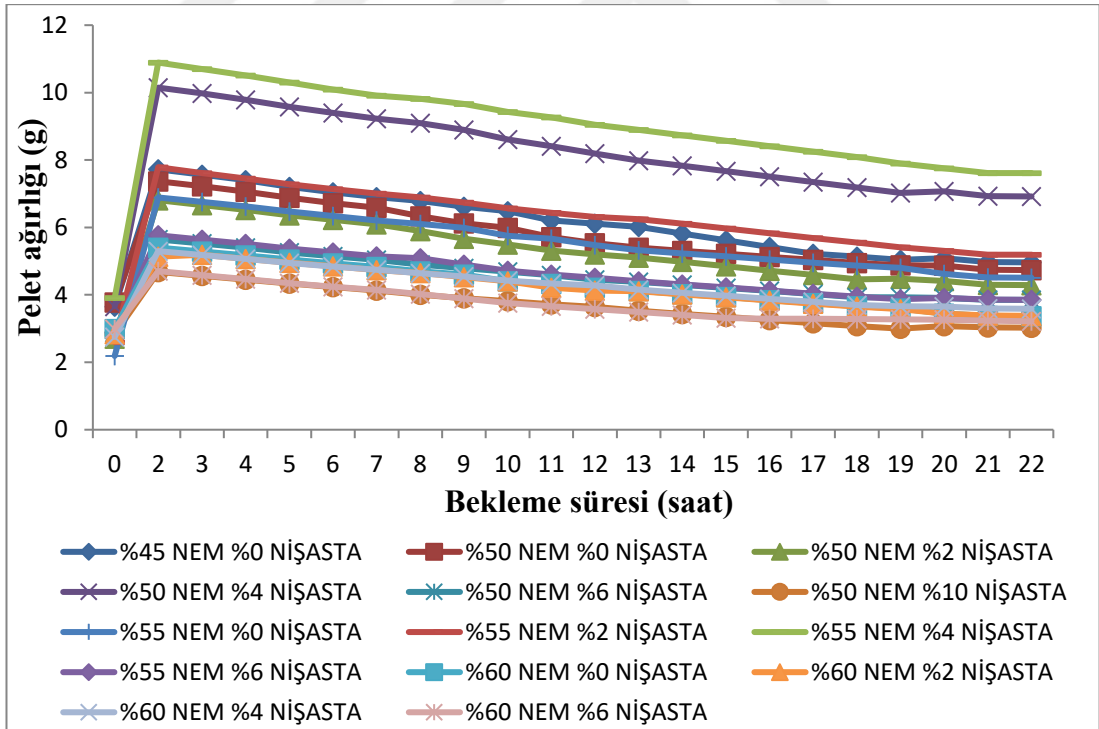
(%50nem+%0 nişasta) ile % 21,86 (%60nem+%6nişasta) arasında olduğu görülürken, torefiye çamın nem çekme miktarının farklı pelet karışımları için 2 saatin sonunda %19,32 (%45nem+%0nişasta) ile %33,41 (%50nem+%10nişasta) arasında gerçekleştiği görülmüştür. Dolayısıyla hem ham hem de torefiye gül peletlerinin çam peletlerine kıyasla nem alma dirençlerinin daha yüksek olduğu ve torefikasyon işleminin biyopeletlerin nem alma direncini arttırdığı dolayısıyla hidrofilik yapıyı hidrofobik yaptığı görülmüştür. Özetle, %5,81 ile % 21,86 arasında torefiye gülün, %37,87 ile %164,95 arasında da torefiye çamın nem almasının daha az olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, torefiye edilmiş çam ve gül peletlerinin su alımına ve daha fazla parçalanmaya karşı direndiği açık olarak çalışmamızda görülmüştür. Ayrıca çalışmada, ham peletlerin çok hızlı bir şekilde parçalandığı ve suda kahverengi renginde bir renklenmenin olduğu gözlenirken, torefiye peletlerin ham peletlere kıyasla daha sert kaldığı ve orijinal şeklini koruduğu ve suyun renginin ham peletlere kıyasla çok daha açık renkli olduğu görülmüştür.

Literatürde de benzer şekilde farklı biyopeletlerin torefikasyonu sonucunda nem almalarının yaklaşık %7 ile %20 arasında bir azalma gösterdiği görülmektedir (Li vd., 2012; Sule, 2012). Literatürde bir çalışmada 200°C'de torefiye edilen peletler, su alımını ilk 10 dakikada kendi başlangıç kütlesinin %40'ından daha azı olarak gerçekleştirmiştir. Ancak torefikasyon sıcaklığının artması ise su alımı daha da azaltmıştır. 240°C'de torefiye peletlerdeki su alımı, başlangıç ağırlığının yaklaşık %4'ü kadarı olarak gerçekleşirken; 280°C ve 300°C'ye kadar torefiye edilen peletler için alım minimum olmuştur. Yine aynı çalışmada ham peletler, suya maruz bırakıldığında ilk 10 dakikada ağırlığını önemli ölçüde arttırmış ve ilk kütlesinin %165'ine ulaşmıştır (Ghiasi, 2019).

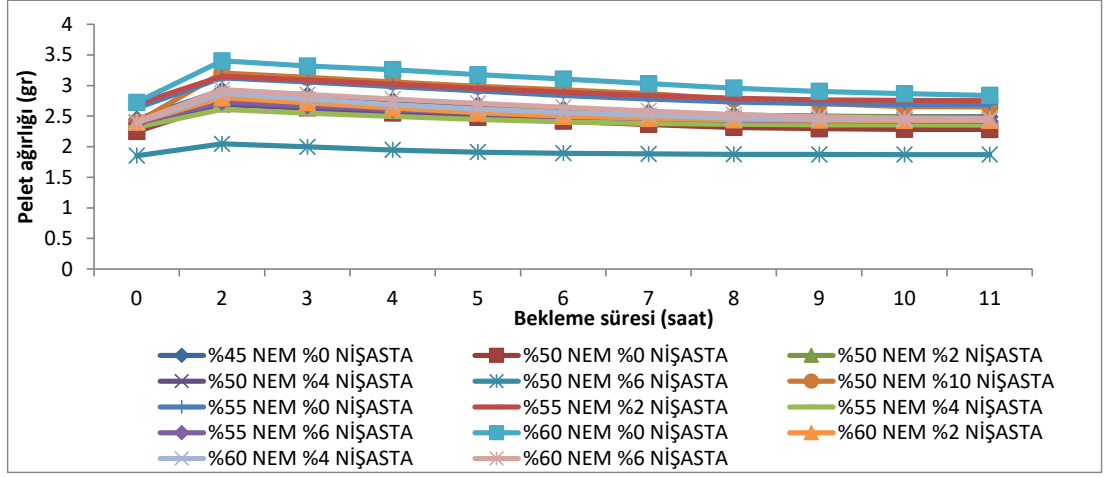




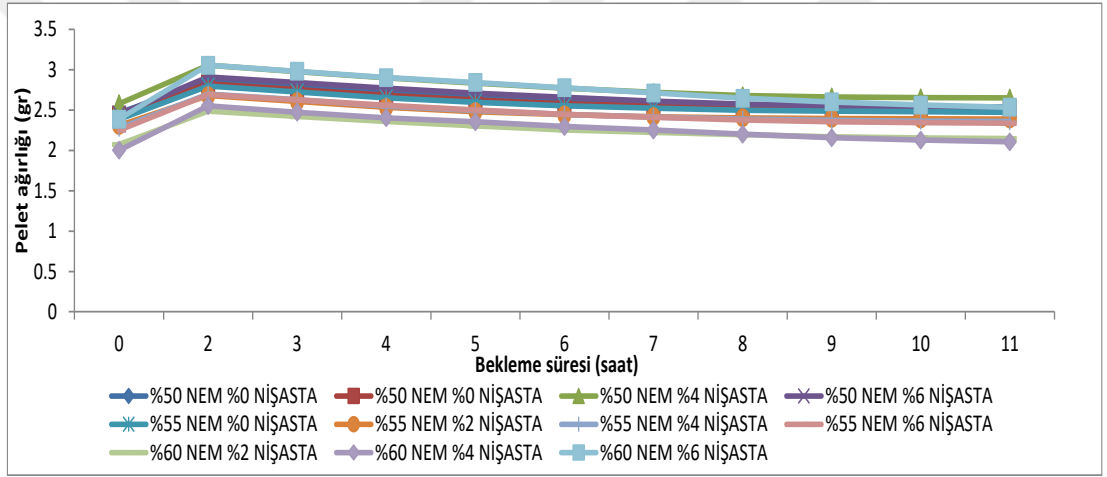
Şekil 4.1. Farklı nem ve bağlayıcı kullanılarak hazırlanmış ham gül posası peletlerinin nem alma direnci



Şekil 4.2. Farklı nem ve bağlayıcı kullanılarak hazırlanmış ham çam peletlerinin nem alma direnci



Şekil 4.3. Farklı nem ve bağlayıcı kullanılarak hazırlanmış torefiye çam peletlerinin nem alma direnci



Şekil 4.4. Farklı nem ve bağlayıcı kullanılarak hazırlanmış torefiye gül posası peletlerinin nem alma direnci

Ayrıca çalışmada genel olarak nem içeriği zaten fazla olan peletler ile nişasta katkısı fazla olan peletlerin nem alma dirençlerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca ham peletlerin suda bekletildiğinde şekillerinde de bozulmalar olduğu açıkça görülmüştür. Dolayısıyla hazırlanacak peletlerin nem alma direncini arttırmak adına torefikasyon işleminin faydalı olduğu, buna karşın pelet hazırlama işleminde nem miktarının ve katkı maddesinin de hazırlanan biyopeletlerin nem alma ve depolama davranışı üzerinde önemli etkileri olduğu aşikardır.

#### 4.7. Deneyler İçin Hazırlanan Peletlerin Depolama Davranışının İncelenmesi

Deneyler sonucunda hazırlanan farklı içerikteki ham ve torefiye peletler kurutulup nem oranı düşürüldükten oda sıcaklığında (20-25°C) ve %50-55 nem oranında ağzı kapalı kilitli plastik poşetlerde 4 yıl boyunca saklanmış ve bu süre sonunda hazırlanan peletlerin hiçbir çeşidinde mikrobiyolojik bir bozunma gözlenmemiştir (Acharya, 2013) (Şekil 4.5.). Ancak literatürde; torefikasyon sırasında hidroksil gruplarının kaybına bağlı olarak (Phanphanich ve Mani, 2011; Kanwal vd., 2019), torefiye biyokütlenin, düşük nem, bozunma ve çürüme riskine karşın (Chen ve Kuo, 2011) açıkta uzun süre saklanabileceği (Niu vd., 2019) belirtilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada da üretilen peletlerin torefikasyon ile nem alma dirençlerinin artış göstermesinden dolayı, torefiye peletlerin ham peletlere kıyasla açık havada daha uzun süre depolanabileceği ön görülmektedir.



Şekil 4.5. Çalışma sırasında üretilmiş ve 4 yıl boyunca kilitli poşetlerde saklanmış olan çam ve gül peletleri

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada gül posası ve çam talaşı farklı nem oranları ve katkı maddesi kullanarak peletlenmiş ve çalışma kapsamında 25 farklı pelet karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan pelet karışımları ön deneyler sonucu elde edilen optimum torefikasyon sıcaklığında (270°C) 1 saat boyunca torefiye edilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan ham ve torefiye peletlere ait yakıt özellikleri incelenmiş olup, çalışma sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

- ISO 17225-1 standardına göre üretilen ham çam peletlerinin hepsinin standardı çap bakımından sağladığı ancak gül peletlerinin çap bakımından bu standardı sağlayamadığı görülmüştür. Yine üretilen tüm ham peletler uzunluk ve parça yoğunluğu bakımından standartta verilen değerleri sağlamıştır.
- ISO TS 17225-8 standardına göre üretilen torefiye olmuş çam ve gül peletleri, standartta verilen çap, uzunluk ve parça yoğunluk değerlerini sağlamıştır.
- Ham çam peletlerinin gerilme mukavemetleri nişasta yüzdesinin artışıyla artmış ancak ham gül peletlerinde belirgin bir artışın olmadığı gözlenmiştir. Hem çam peletlerinde hem de gül peletlerinde nem oranı arttıkça peletlerin dayanımı azalmıştır.
- Torefiye edilen peletlerde de nem oranı arttıkça hem gül hem de çam talaşı peletlerinin dayanımlarında bir düşüş olduğu gözlenmekle birlikte, ham peletlerde olduğu gibi artan nişasta oranı ile birlikte torefiye peletlerin gerilme mukavemetleri de bir artış göstermiştir.
- Genel olarak torefiye olan peletlerin kül içerikleri, sabit karbon içerikleri ve üst ısı değerleri ham hallerine kıyasla artış göstermiştir. Bununla beraber genel olarak nem ve uçucu madde içerikleri ise azalış göstermiştir.
- Çalışmada kullanılan başlangıç nem içeriği ile peletin nihai nem içeriği ile arasında istatistiki olarak anlamlı bir fark ( $p>0,05$ ) hem ham hem de torefiye biyo-peletlerde bulunamamıştır.
- Torefikasyon sonucunda, peletlerin sabit karbon içeriğindeki artışa paralel olarak ham çam peletlerinin kalorifik değeri torefikasyon ile 17,51-18,80 MJ/kg'dan 20,20-21,73 MJ/kg'a, ham gül peletlerinin kalorifik değeri de 17,42-18,54 MJ/kg'dan 19,13-20,92 MJ/kg'a yükselmiştir.

- Hazırlanan ham çam ve gül peletlerinin nem içeriği standartta verilen değeri sağlamıştır. Ancak ham çam peletlerinin kül kısıtını sağlamasına rağmen, ham gül peletlerinin kül oranı standartta verilen limit değer'den yaklaşık 3-4 kat büyük bulunmuştur. Benzer şekilde torefiye çam peletleri de standartta verilen kül ve nem değerlerini sağlarken, torefiye gül peletleri standartta izin verilen kül içeriğinden daha yüksek çıkmıştır.
- Çalışmada torefiye çam ve gül peletleri için nem oranı ile enerji verimi, enerji yoğunluğu ve kütle verimi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir değişim bulunamamıştır ( $p>0,05$ ). Buna karşın enerji yoğunluk oranları genel olarak artan nişasta içeriğiyle birlikte hem torefiye gül hem de torefiye çam peletlerinde bir artış göstermiştir.
- Çam peletlerinde kütle verimi ile enerji verimi arasında anlamlı ( $p<0,05$ ;  $R^2=0,665$ ) bir ilişki bulunurken, kütle verimi ile enerji yoğunluğu arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır ( $p>0,05$ ;  $R^2=0,025$ ). Gül peletlerinin ise hem kütle verimi ile enerji verimi arasında anlamlı ( $p<0,05$ ;  $R^2=0,797$ ) hem de kütle verimi ile enerji yoğunluğu arasında anlamlı bir ilişki bulunmuştur ( $p<0,05$ ;  $R^2=0,548$ ).
- Aynı nem oranlarında ham çam peletleri 2,4 - 6 kat arasında değişen oranlarda ham gül peletlerine kıyasla daha fazla kırılmaya ve ufalanmaya yatkın bulunmuştur.
- Torefikasyon işlemi peletlerin kırılma ve ufalanma miktarlarını arttırmıştır. Torefiye çam peletleri ham çam peletlerine kıyasla 2-4,7 kat daha fazla kırılğan bulunurken, torefiye gül peletleri ham gül peletlerine kıyasla 6,4-12 kat daha fazla kırılğan bulunmuştur.
- Bu çalışmada, torefiye gül ve torefiye çam peletlerinin gerilme mukavemetlerindeki düşüş benzer çıksa da gül peletlerinin torefikasyon sonucunda çama kıyasla daha fazla kırılğan ve ufalanmaya meyilli olduğu görülmektedir.
- Torefiye olan peletler nem alma konusunda ham peletlere kıyasla daha kararlı bulunmuştur.
- Hem ham hem de torefiye gül peletlerinin çam peletlerine kıyasla nem alma dirençlerinin daha yüksek olduğu ve torefikasyon işleminin biyopeletlerin nem

alma direncini arttırdığı dolayısıyla hidrofilik yapıyı hidrofobik yaptığı görülmüştür.

- %5,81 ile % 21,86 arasında torefiye gülün, %37,87 ile %164,95 arasında da torefiye çamın nem almasının daha az olduğu görülmüştür.
- Torefiye edilmiş çam ve gül peletlerinin su alımına ve daha fazla parçalanmaya karşı direndiği açık olarak çalışmamızda görülmüştür.
- Üretilen ham ve torefiye peletler ağzı kapalı kilitli plastik poşetlerde 4 yıl boyunca saklanmış ve bu süre sonunda peletlerin hiçbir çeşidinde mikrobiyolojik bir bozunma gözlenmemiştir.
- Bu çalışmada da üretilen peletlerin torefikasyon ile nem alma dirençlerinin artış göstermesinden dolayı, torefiye peletlerin ham peletlere kıyasla açık havada daha uzun süre depolanabileceği yine bu çalışma sonucunda ön görülmektedir.

Özetle, ülkemizde ahşap peletlerin yakıt olarak kullanımı ile sera gazlarının atmosfere salınımının azaltılması, küresel iklim değişikliğine destek olmak için taraf olduğumuz anlaşmalar uyarınca taahhüt edilen CO<sub>2</sub> düzeylerinin sağlanması ve sürdürülebilir bir yakıt eldesi mümkün olacaktır. Ayrıca, her ne kadar şu an maliyet açısından termokimyasal sistemlerde pellet kullanımı klasik fosil yakıtlara kıyasla daha pahalı olsa da, gelecekte küresel ısınmaya yönelik alınacak daha sıkı tedbirler ve teşvikler kapsamında pellet üretiminin ve kullanımının tüm dünyada daha cazip bir hale geleceği ön görülmektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılan çam ve gül peletleri üretildikten sonra torefikasyon işlemine tabi tutulmuş ve hazırlanan torefiye peletlerin yakıt özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada 3 kw'lık bir peletleme makinası kullanıldığı için malzemeye özel basma tablası ve die açıklığı her karışım için aynı olmak durumunda kalmıştır. Bu iki durum daha kompakt/dayanımı fazla/dış yüzeyleri pürüzsüz pelet üretimi için çalışmada sınırlayıcı parametreler olmuştur.

Çalışma sonucunda edinilen tecrübeler ışığında;

- Ham/torefiye pelet üretiminde ön ısıtmalı peletleme sistemlerinin kullanılması,
- Pelet dayanımını arttırmak adına nişasta yerine kullanılabilir (özellikle atık ürün olarak ortaya çıkan) farklı katkı maddelerinin de çalışmalarda araştırılması,
- Farklı biyokütleler ve karışımları için peletleme makinasındaki teknik parçaların optimize edilmesi,
- Ham malzeme torefiye edildikten sonra peletleme işleminin yapılarak, sonradan torefiye edilen peletler ile yakıt özellikleri açısından karşılaştırılması,
- Bir deney optimizasyonu çalışmasının gerçekleştirilmesi
- Üretilen herbir ham ve torefiye pellet karışımı için bir maliyet analizinin gerçekleştirilerek, üretilen birim ton başına ne kadar bir maliyetin oluştuğunun belirlenmesi önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Abelha, P., Gulyurtlu, I., Boavida, D., Barros, J. S., Cabrita, I., Leahy, J., Leahy, M., 2003. Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor. *Fuel*, 82(6), 687-692.
- Acharya, B. 2013, "Torrefaction and Pelletization of Different Forms of Biomass of Ontario", A Thesis Presented to The University of Guelph. 153 pp.
- Acharjee, T.C., Coronella, C.J., Vasquez, V.R., 2011. Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 102(7), pp.4849-4854.
- Akdağ, N. F., 2007. Hidrolik ve yenilenebilir enerji çalışma grubu biyokütle enerjisi alt çalışma grubu raporu.
- Alparslan, S., Ertekin, C., 2018. "Karanfil Bitkisi Biyokütle Artıklarının Peletlenmesinde Parça Boyutunun Etkisi," *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, pp. 0–0, Dec. 2018.
- Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M.G., Rubiera, F., Pis, J.J., "2008. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass". *Fuel Processing Technology*, 89(2), pp.169-175.
- Aydın, FF, 2018. D-8 Ülkelerindeki Kütle Enerjisi Tüketimi ile Ekonomik Büyüme Arasındaki Biyo İlişki. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6 (3), 371-377.
- Bada, S. O., Falcon, R. M. S., Falcon, L. M. 2014, "Investigation of combustion and co-combustion characteristics of raw and thermal treated bamboo with thermal gravimetric analysis", *Thermochimica Acta*, 589, 207-214.
- Balat, M. 2005, "Use of biomass sources for energy in Turkey and a view to biomass potential", *Biomass and Bioenergy*, 29(1), 32–41.
- Basu, P., Sadhukhan, A. K., Gupta, P., Rao, S., Dhungana, A., Acharya, B., 2014. "An experimental and theoretical investigation on torrefaction of a large wet woodparticle," *Bioresource Technol.* 159, 215-22. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.02.105
- Bergman, P.C., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R., Kiel, J.H.A., 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. *Energy Research Centre of the Netherlands*, ECN-C-05-013.
- Botelho, T., Costa, M., Wilk, M., Magdziarz, A., 2018. "Evaluation of the combustion characteristics of raw and torrefied grape pomace in a thermogravimetric analyzer and in a drop tube furnace". *Fuel*, 212, pp.95-100.

- Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Shield, I., Williams, P. T., 2008. "Torrefaction of freed canary grass, wheat straw, and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties," *Fuel* 87(6), 844-856. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.05.041.
- Chen, Q., Zhou, J., Liu, B., Mei, Q., Luo, Z., 2011. "Influence of torrefaction pretreatment on biomass gasification technology". *Chinese Science Bulletin*, 56(14), pp.1449-1456.
- Chowdhury, Z.Z., Pal, K., Johan, R.B., Dabdawb, W.A.Y., Ali, M.E., Rafique, R.F., 2017, "Comparative evaluation of physiochemical properties of a solid fuel derived from *Adansonia digitata* trunk using torrefaction". *BioResources*, 12(2), pp.3816-3833.
- Ciolkosz, D., Wallace, R., 2011. "A review of torrefaction for bioenergy feedstock production". *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(3), pp.317-329.
- Çağal, F. E., 2009. *Biyokütle enerjisi potansiyelinin Türkiye açısından değerlendirilmesi* (Master's thesis, Enerji Enstitüsü).
- Çetinkaya, Büşra, 2021. *Yağ Gülü (Rosa Damascena Mill.) Damıtma Atıkları Ve Kızılçam (Pinus Brutia Ten.) Talaşı Kullanılarak Hazırlanan Ham Ve Torefiye Biyopelletlerin Yakıt Karakteristiklerinin Belirlenmesi*, (Master's thesis, SDU)
- Chen, W.H., Kuo, P.C., 2011. "Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass". *Energy*, 36(2), pp.803-811.
- Chen, W.H., Wu, J.S., 2009. An evaluation on rice husks and pulverized coal blends using a drop tube furnace and a thermogravimetric analyzer for application to a blast furnace. *Energy*, 34(10), pp.1458-1466.
- Couhert, C., Salvador, S., Commandré, J. M., 2009. "Impact of torrefaction on syngas production from wood," *Fuel* 88(11), 2286-2290. DOI:10.1016/j.fuel.2009.05.003.
- Çepelioğullar, Ö., Haykırı-Açma, H., Yaman, S., 2016. Kinetic modelling of RDF pyrolysis: Model-fitting and model-free approaches. *Waste management*, 48, 275-284.
- Dias, D. S., Crespi, M. S., Torquato, L. D., Kobelnik, M., Ribeiro, C. A., 2018. Torrefied banana tree fiber pellets having embedded urea for agricultural use. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(1), 705-712.
- Deng, J., Wang, G. J., Kuang, J. H., Zhang, Y. L., and Luo, Y. H., 2009. "Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction," *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 86(2), 331-337. DOI: 10.1016/j.jaap.2009.08.006
- Dhungana, A., Basu, P., Dutta, A., 2012. Effects of reactor design on the torrefaction of biomass. *Journal of energy resources technology*, 134(4).

- Dutta, A., Leon, M.A., Pros and cons of torrefaction of woody biomass, [https://www.agrireseau.net/references/32/presentations\\_guelph/2Torrefaction%20-%20Pros%20and%20Cons%20By%20Mathias%20Leon%20UoG.pdf](https://www.agrireseau.net/references/32/presentations_guelph/2Torrefaction%20-%20Pros%20and%20Cons%20By%20Mathias%20Leon%20UoG.pdf), Erişim tarihi 08/03/2021.
- Enerji, 2022. TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik#:~:text=T%C3%BCrkiye%20elektrik%20enerjisi%20t%C3%BCketimi%202021,7%20milyar%20kWh%20olarak%20ger%C3%A7ekle%C5%9Fmi%C5%9Ftir> (Erişim tarihi: 20 Kasım 2022).
- Eseyin, A. E., Steele, P. H., Pittman Jr, C. U., 2015. Current trends in the production and applications of torrefied wood/biomass-A review. *BioResources*, 10(4), 8812-8858.
- Fadimatou, H., Hamadou, B., Nguela, L. M., Christophe, G., Michaud, P., 2021. Improvement of thermophysical quality of biomass pellets produced from rice husks. *Energy Conversion and Management*: X, 12, 100132.
- FAOSTAT. 2022. <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (Erişim tarihi: 4 Ekim 2022).
- Felfli, F. F., Luengo, C. A., Suarez, J. A., Beaton, P. A. 2005. “Wood Briquette Torrefaction,” *Energy for Sustainable Development*, 9 (3) 19-22.
- Ghiasi, B. (2019). Steam Assisted Pelletization and Torrefaction of Lignocellulosic Biomass. PhD. Vancouver, British Columbia, Canada: Thesis submitted to the University of British Columbia.
- Greinert, A., Mrówczyńska, M., Grech, R., Szefer, W., 2020. The use of plant biomass pellets for energy production by combustion in dedicated furnaces. *Energies*, 13(2), 463.
- Hardy, T., Musialik-Piotrowska, A., Ciołek, J., Mościcki, K., and Kordylewski, W., 2012. “Negative effects of biomass combustion and co-combustion in boilers,” *Enviro Protec Engin*, 38(1), 25-33.
- He, Y., Wu, T., Wang, X., Chen, B., Chen, F., 2018. Cost-effective biodiesel production from wet microalgal biomass by a novel two-step enzymatic process. *Bioresource technology*, 268, 583-591.
- Hu, W., Yang, X., Mi, B., Liang, F., Zhang, T., Fei, B., Jiang, Z. and Liu, Z., 2017. Investigating chemical properties and combustion characteristics of torrefied masson pine. *Wood and Fiber Science*, 49(1), pp.33-42.
- Hudakorn, T., Srirakul, N., 2020. Biogas and biomass pellet production from water hyacinth. *Energy Reports*, 6, 532-538.
- Isemin, R., Mikhalev, A., Klimov, D., Grammelis, P., Margaritis, N., Kourkoumpas, D. S., & Zaichenko, V., 2017. Torrefaction and combustion of pellets made of a mixture of coal sludge and straw. *Fuel*, 210, 859-865.

- Isik, A. Z., Gode, F., Bodur, T., Gunturkun, F., Gurbuz, A. S., Tamer, B., Pala, I., 2019. Comparison of microfluid sperm sorting chip and density gradient methods for use in intrauterine insemination cycles. *Fertility and sterility*, 112(5), 842-848.
- Karayılmazlar S., Saraçoğlu N., Çabuk Y., Kurt F., 2011. Biyokütlenin Türkiye’de Enerji Üretiminde Değerlendirilmesi, B.Ü, Bartın Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, 74100
- Kanwal, S., Chaudhry, N., Munir, S. and Sana, H., 2019. Effect of torrefaction conditions on the physicochemical characterization of agricultural waste (sugarcane bagasse). *Waste Management*, 88, pp.280-290.
- Khazraie Shoulaifar, T., DeMartini, N., Willför, S., Pranovich, A., Smeds, A. I., Virtanen, T. A. P., Hupa, M., 2014. Impact of torrefaction on the chemical structure of birch wood. *Energy & fuels*, 28(6), 3863-3872.
- Koçer, A., Bilgin, S., Yılmaz, H., Acar, M., Dok, M., 2016. “Çay Fabrikası Atıklarının Peletlenmesi ve Pelet Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi,” *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, vol. 33, pp. 70–80, Aug. 2016.
- Kohl, T., Laukkanen, T., Järvinen, M., Fogelholm, C. J., 2013. Energetic and environmental performance of three biomass upgrading processes integrated with a CHP plant. *Applied energy*, 107, 124-134.
- Küsek, G., Güngör, C., Öztürk, H.H., 2015, "Tarımsal Artıklardan Biyopelet Üretimi", *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2), 137–145.
- Li, X., Zhou, Y., Guo, H., Yan, G., Wang, Z., Yang, Z., Wang, J., 2018. Fluidized bed reaction towards crystalline embedded amorphous Si anode with much enhanced cycling stability. *Chemical communications*, 54(30), 3755-3758.
- Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Lim, C. J., Sokhansanj, S. 2012. “Pelletization of Torrefied Sawdust and Properties of Torrefied Pellets,” *Applied Energy*, 93 680-685.
- Lu, Z., Jian, J., Jensen, P.A., Wu, H. and Glarborg, P., 2016. “Influence of torrefaction on single particle combustion of wood”. *Energy & Fuels*, 30(7), pp.5772-5778.
- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S., 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and bioenergy*, 30(7), 648-654.
- Medic, D., Darr, M., Potter, B. and Shah, A., 2010. Effect of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. In 2010 Pittsburgh, Pennsylvania, June 20-June 23, 2010 (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

- Melero, J. A., Iglesias, J., Garcia, A., 2012. Biomass as renewable feedstock in standard refinery units. Feasibility, opportunities and challenges. *Energy & environmental science*, 5(6), 7393-7420.
- Mitchell, E. J. S., Gudka, B., Whittaker, C., Shield, I., Price-Allison, A., Maxwell, D., & Williams, A., 2020. The use of agricultural residues, wood briquettes and logs for small-scale domestic heating. *Fuel Processing Technology*, 210, 106552.
- Nhuchhen, D.R., Basu, P. and Acharya, B., 2014. A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014, pp.1-56.
- Niu, Y., Lv, Y., Lei, Y., Liu, S., Liang, Y., Wang, D., 2019. Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109395.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., Catalão, J. P. S., 2014. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 153-160.
- 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.
- Pahla, G., Ntuli, F. and Muzenda, E., 2018. Torrefaction of landfill food waste for possible application in biomass co-firing. *Waste management*, 71, pp.512-520.
- Pelet yakıtının özellikleri. <https://peletbruloru.com/post/pelet-yakitinin-ozellikleri-nelerdir/#:~:text=1%20kg%20pelet%2C%20yakla%C5%9F%C4%B1k%204500,m3%20%E2%80%931100kg%2Fm3%20aras%C4%B1ndad%C4%B1r> (Erişim tarihi; 20 Kasım 2022).
- Phanphanich, M. and Mani, S., 2011. "Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass". *Bioresource technology*, 102(2), pp.1246-1253.
- Pimchuai, A., Dutta, A. and Basu, P., 2010. "Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties". *Energy & Fuels*, 24(9), pp.4638-4645.
- Prins, M. J., Ptasinski, K. J., and Janssen, F. J. J. G., 2006. "Torrefaction of wood, Part1: Weight loss kinetics," *J. Anal. Appl. Pyrol.* 77(1), 28-34. DOI:10.1016/j.jaap.2006.01.002.
- Repellin, V., Govin, A., Rolland, M. and Guyonnet, R., 2010. "Energy requirement for fine grinding of torrefied wood". *Biomass and Bioenergy*, 34(7), pp.923-930.

- Reza, M. T., Lynam, J. G., Uddin, M. H., Coronella, C. J., 2013. "Hydrothermal carbonization: Fate of inorganics," *Biomass Bioenerg.* 49, 86-94. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.12.004
- Rosillo-Calle, F., Johnson, F. X., 2007. Biomass, livelihoods and international trade. challenges and opportunities for the EU and Southern Africa.
- Rousset, P., Aguiar, C., Labbé, N., Commandré, J. M., 2011. "Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction," *Bioresource Technol.* 102(17), 8225-8231. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.05.093
- Sadaka, S., Negi, S., 2009. "Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics in via torrefaction process," *Environ. Prog. Sustain. Energy* 28(3), 427-434. DOI: 10.1002/ep.10392
- Simões Amaral, S., Andrade de Carvalho Jr, J., Martins Costa, M. A., & Pinheiro, C. (2016). Particulate matter emission factors for biomass combustion. *Atmosphere*, 7(11), 141.
- Sule, I.O. 2012. 'Torrefaction Behavior of Agricultural Biomass,' M.Sc Thesis, School of Engineering, University of Guelph, Ontario, Canada.
- Toptas, A., Yildirim, Y., Duman, G., Yanik, J., 2015, "Combustion behavior of different kinds of torrefied biomass and their blends with lignite", *Bioresource Technology*, 177, 328–336.
- Tosun, İ., Gönüllü, M.T., Arslankaya, E., 2002, "Gülyağı Sanayi Proses Atıkları Özelliklerinin Belirlenmesi", 1. Ulusal Çevre Sorunları Sempozyumu, Atatürk Üniversitesi, Çevre Sorunları Araştırma Merkezi Müdürlüğü, 1, 864-873, 16-18 Ekim 2002, Erzurum.
- Tumuluru, J.S., Ghiasi, B., Soelberg, N.R. and Sokhansanj, S., 2021. "Biomass torrefaction process, product properties, reactor types, and moving bed reactor design concepts". *Frontiers in Energy Research*, 9, p.728140.
- Türkiye Ormancılığı. 2019. ISBN: 978–975–93478–4–0, Kuban Matbaacılık Yayıncılık. Ankara.
- Valix, M., Katyal, S. and Cheung, W.H., 2017. Combustion of thermochemically torrefied sugar cane bagasse. *Bioresource technology*, 223, pp.202-209.
- Van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A. and Ptasiński, K.J., 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and bioenergy*, 35(9), pp.3748-3762.
- Wang, G., Luo, Y., Deng, J., Kuang, J. and Zhang, Y., 2011. "Pretreatment of biomass by torrefaction. *Chinese Science Bulletin*", 56(14), pp.1442-1448.
- Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., Yang, H., Wang, X., Chen, D., Rudolfsson, M. and Nielsen, H.K., 2020. Effect of Torrefaction on Properties of Pellets Produced from Woody Biomass. *Energy & Fuels*.

- Whittaker, R. H., Niering, W. A., 1975. Vegetation of the Santa Catalina Mountains, Arizona. V. Biomass, production, and diversity along the elevation gradient. *Ecology*, 56(4), 771-790.
- Xin, S., Huang, F., Liu, X., Mi, T., Xu, Q., 2019. Torrefaction of herbal medicine wastes: Characterization of the physicochemical properties and combustion behaviors. *Bioresource technology*, 287, p.121408.
- Xu, G., Li, M., Lu, P., 2019. Experimental investigation on flow properties of different biomass and torrefied biomass powders. *Biomass and Bioenergy*, 122, pp.63-75.
- Yan, W., Tapas, C. A., Coronella, C. J., Victor, R. V., 2009. "Thermal pretreatment of Lignocellulosic biomass," *Environmental Progress and Sustainable Energy* 28(3),435-440. DOI: 10.1002/ep.10385
- Yang, Y., Sun, M., Zhang, M., Zhang, K., Wang, D., Lei, C., 2019. "A fundamental research on synchronized torrefaction and pelleting of biomass". *Renewable Energy*, 142, pp.668-676.
- Yurdakul S., 2016. "Determination of co-combustion properties and thermal kinetics of poultry litter/coal blends using thermogravimetry", *Renewable Energy*, 89, 215-223.
- Yurdakul S., Civan M., 2018. TÜBİTAK 118Y247. Gül Atığı Kullanılarak Hazırlanan Ham ve Torefiye Edilmiş Biyopeletlerin Yanma Karakteristiklerinin, Kinetiklerinin ve Yakıt Karakteristiklerinin Belirlenmesi.
- Zhu, S., Lee, S. W., 2005. Co-combustion performance of poultry wastes and natural gas in the advanced Swirling Fluidized Bed Combustor (SFBC). *Waste management*, 25(5), 511-518.