

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ZEYTİN BUDAMA VE SERA DOMATES ARTIKLARININ
PELETLENMESİNDE SICAK BUHAR UYGULAMASI VE PELET
TOREFİKASYON İŞLEMİNİN PELET KALİTE PARAMETRELERİNE
ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

Hasan YILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIM MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

EKİM 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ZEYTİN BUDAMA VE SERA DOMATES ARTIKLARININ
PELETLENMESİNDE SICAK BUHAR UYGULAMASI VE PELET
TOREFİKASYON İŞLEMİNİN PELET KALİTE PARAMETRELERİNE
ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

Hasan YILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIM MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

EKİM 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEYTİN BUDAMA VE SERA DOMATES ARTIKLARININ
PELETLENMESİNDE SICAK BUHAR UYGULAMASI VE PELET
TOREFİKASYON İŞLEMİNİN PELET KALİTE PARAMETRELERİNE
ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

Hasan YILMAZ

TARIM MAKİNALARI VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 13/10/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet TOPAKCI (Danışman)

Prof. Dr. Ahmet KÜRKLÜ

Doç. Dr. Murat VAROL

Prof. Dr. Türkan AKTAŞ

Prof. Dr. Gürkan Alp Kağan GÜRDİL

ÖZET

ZEYTİN BUDAMA VE SERA DOMATES ARTIKLARININ PELETLENMESİNDE SICAK BUHAR UYGULAMASI VE PELET TOREFİKASYON İŞLEMİNİN PELET KALİTE PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

Hasan YILMAZ

**Doktora Tezi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği
Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mehmet TOPAKCI

Ekim 2022; 166 sayfa

Son yıllarda, evsel ve endüstriyel ısı ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla odun peletlerinin üretimi ve tüketimi dünya çapında artış göstermiştir. Artan talep, odun peletlerinin birincil hammaddesi olan orman endüstrisi artıklarının sürdürülebilir temininde aksaklıklara neden olmaktadır. Bu durum dünya çapındaki başlıca pelet üreticisi ülkelerin hammadde veya doğrudan odun peleti ithalatına yönelmesine neden olmuştur. Yerli enerji kaynağı kullanımının son derece stratejik olduğu günümüzde, mevcut tarımsal artıkların pelet olarak değerlendirilmesi pelet hammaddesi temin sorunlarına çözüm niteliğindedir. Tarımsal artıkların pelet olarak değerlendirilebilmesi için orman ürünlerinden farklı olan peletleme değişkenlerinin optimize edilmesi ve yakıt iyileştirme teknolojileriyle uyumluluğunun araştırılması konusunda ulusal ve uluslararası literatürde eksiklik bulunmaktadır. Tarımsal artıkların ürün bazında değişken fiziksel ve kimyasal yapısı her bir tarımsal artığın peletlenebilme karakteristiklerinin ve termokimyasal dönüşüm yöntemlerine tepkilerinin ürün bazında belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Tarımsal artıkların sürdürülebilir temini, peletleme değişkenlerinin optimize edilmesi ve peletlere yakıt iyileştirme teknolojilerinin uyarlanmasıyla dünya çapında pelet üretimine önemli katkılar sunması beklenmektedir.

Bu çalışmada, tarımsal artıklardan sera domates sapları (SD) ve zeytin budama (ZB) artıkları alternatif pelet hammaddesi olarak kullanılmıştır. Odun peleti üretiminde yaygın biçimde kullanılan sıcak buharlı peletleme yöntemi tarımsal artıklara uyarlanarak, sıcak buhar düzeyinin peletleme parametrelerine, pelet fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Tarımsal artıkların odun peletlerine ve kömüre kıyasla görece düşük kalitede yakıt özelliklerine sahip olması nedeniyle torefikasyon yöntemiyle peletlerin yakıt özelliklerinde iyileştirme işlemi yapılmıştır. Elde edilen peletler otomatik beslemeli ev tipi bir pelet sobasında yakılarak yanma performansları ve baca gazı emisyonu değerleri incelenmiştir.

Çalışma sonunda elde edilen sonuçlara göre, sıcak buharlı peletleme işlemi pelet üretim kapasitesini SD peletlerinde %112 arttırırken, ZB peletlerinde %50 artış meydana gelmiştir. Sıcak buhar uygulaması peletleme sırasında özgül enerji tüketimlerini düşürerek SD'de 114.07 kWh/ton, ZB'de 152.80 kWh/ton değerleri hesaplanmıştır. Sıcak buhar, peletleme sırasında hammadde fiziksel özellikleri ve lignoselülozik yapıya göre her iki tarımsal artığın pelet üretim parametreleri ve pelet fiziksel özelliklerine farklı

düzeyletlerde etki etmiştir. Genel anlamda, sıcak buhar düzeyinin artışı, peleti oluşturan öğütölmüş partiköller arası bağı kuvvetlendirerek daha yoğun ve dayanıklı peletler üretilmesine olanak sağlamıştır. Böylece, SD peletlerinde en yüksek parça yoğunluğu ve yığın yoğunluğu değeri sırasıyla 1395 kg/m³ ve 833 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. ZB peletleri için en verimli buhar düzeyinde parça yoğunluğu ve yığın yoğunluğu değeri sırasıyla 1289 kg/m³ ve 736 kg/m³'tür. Sıcak buhar uygulamasının pelet üretim parametreleri ve pelet fiziksel özellikleri üzerindeki iyileştirme etkisi öğütölmüş hammaddenin partiköl boyutu ve lignoselölözük içeriğıyle doğrudan ilişkilidir. Peletlerin torefikasyonu azot ortamında, 220, 250 ve 280 °C sıcaklıklarda 15 dakika işlem süresince gerçekleştirilmiştir. Artan sıcaklık peletlerin yakıt özelliklerinde iyileşmeye neden olurken, fiziksel açıdan pelet kırılmalıklıklarında artış meydana gelmiştir. Ayrıca, sıcak buhar düzeyinin artışı sıcak buharsız peletlemeye göre daha yoğun formda peletler üretilmesine olanak sağladığı için yoğun peletler torefikasyona karşı direnç göstermişlerdir. Torefikasyon işlemiyle elde edilen en yüksek iyileştirme faktörü SD ve ZB peletlerinde sırasıyla 1.20 ve 1.18 olarak hesaplanmıştır. İşlem görmemiş SD peletlerinin 16.91 MJ/kg olan ısı değeri torefikasyon işlemiyle 20.29 MJ/kg'a, ZD peletlerinde 17.52 MJ/kg olan ısı değeri 20.73 MJ/kg'a yükselmiştir. Artan torefikasyon sıcaklığıyla koyulaşan peletlerin renk parametreleri farklılığıyla torefikasyon verimlilikleri arasında yüksek düzeyde ilişki ($R^2 \geq 0.90$) tespit edilmiştir.

Peletlerin yakılmasında, domates sapı artıklarının içerdiği plastik askı ipi ve plastik klip partiköllerini yanma odasında cüruflaşma ve tıkanma meydana getirmiştir. Bu bakımdan verimli yanma için yeterli hava akışının sağlanamaması CO ve NO_x emisyonlarının sırasıyla 2363-11616 ppm ve 123-296 ppm düzeylerinde elde edilmesine neden olmuştur. Sera domates saplarının %0.26-0.44 düzeyinde kükört içermesi yanma sırasında 35-203 ppm düzeylerinde SO₂ salınımı meydana getirmiştir. ZD peletlerinin yakılması sırasında yanma odasında kül birikmesi ve cüruflaşma meydana gelmemiş olup, yanma verimleri SD peletlerine göre oldukça üstündür. SD ve ZD peletlerinin ortalama baca gazı sıcaklıkları sırasıyla 110-213 °C ve 198-269 °C düzeyindedir. ZD peletlerinde CO ve NO_x emisyonları sırasıyla 764-2353 ppm ve 134-206 ppm aralığındadır.

Tarımsal artıkların peletlenme karakteristikleri artık tipine, öğütölmüş hammadde parçacık boyutuna ve sıcak buhar düzeyine göre farklılık göstermektedir. Bu bakımdan, tarımsal artıkların verimli peletleme işlemi için peletleme değışkenlerinin artık tipine göre ayrı ayrı değeriendirilmesi gerekmektedir. Yakıt özelliklerini iyileştirmek adına kullanılan torefikasyon işlemi tarımsal artıkların yakıt kalitesini arttırmak için kullanılabilir umut vadeden bir dönüşüm teknolojisidir. Tarımsal ürünlerin yetiştiriciliğinde kullanılan azot ve kükört içerikleri gübreler tarımsal artıklardan elde edilen biyokötle yakıtlarının elementel içeriklerine ve yanma karakteristiklerine doğrudan ve dolaylı olarak etkide bulunurlar. Ayrıca, seralarda yetiştiricilikte kullanımı zorunlu olan askı ipi, plastik klips gibi yabancı maddelerin, sera artıklarından üretilcek peletlerin yanma kalitesini olumsuz yönde etkileme potansiyeli bulunmaktadır. Genel anlamda, tarımsal artıkların pelet hammaddesi olarak kullanımı ulusal enerji kaynaklarının üretilmesi kapsamında stratejik öneme sahiptir. Tarımsal peletlerin ısı verimliliğinin maksimize edilmesi için özgül yakma sistemleri ve yakma yöntemlerinin üzerine çalışmalar yürütölmeli gerekmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Biyokütle, biyokütle peleti, peletleme, tarımsal artıklar, torefikasyon, yakma

JÜRİ: Prof. Dr. Mehmet TOPAKCI

Prof. Dr. Ahmet KÜRKLÜ

Doç. Dr. Murat VAROL

Prof. Dr. Türkan AKTAŞ

Prof. Dr. Gürkan Alp Kağan GÜRDİL



ABSTRACT

DETERMINATION OF THE EFFECT OF STEAM CONDITIONING AND TORREFACTION PROCESS ON PELLET QUALITY PARAMETERS IN OLIVE PRUNING RESIDUES AND GREENHOUSE TOMATO RESIDUES

Hasan YILMAZ

PhD Thesis in Department of Agricultural Machinery and Technologies Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet TOPAKCI

October; 166 pages

In recent years, the production and consumption of wood pellets has increased worldwide in order to meet domestic and industrial thermal needs. Increasing demand brings along the disruptions in the sustainable supply of forest industry residues, which is the primary raw material of wood pellets. This situation has led the world major pellet producer countries to import raw materials or directly wood pellets. The use of domestic energy resources is in an extremely strategic position today. The use of existing domestic agricultural residues as pellets is a solution to the pellet raw material supply problems. In order to evaluate agricultural residues as pellets, there are sufficient experimental studies on optimizing the pelletizing variables that are different from forest products and investigating their compatibility with fuel improvement technologies. There are not enough experimental studies on optimizing the pelletizing variables of agricultural residues that are different from forest products and investigating their compatibility with fuel enhancement technologies. The variable physical and chemical structure of agricultural residues on a product basis confirms the necessity of determining the pelletization characteristics of each agricultural residue and its reactions to thermochemical conversion methods on a product basis. It is expected to make significant contributions to pellet production worldwide through the sustainable supply of agricultural residues, optimizing pelletizing variables, and adapting fuel enhancement technologies to pellets.

In this study, greenhouse tomato stems (SD) and olive pruning residues (ZB) were used as alternative pellet raw materials. The pelletizing with steam conditioning method, which is widely used in wood pellet production, has been adapted to agricultural residues. Thus, the effect of the hot steam level on the pelletizing parameters and the physical properties of the pellets were investigated. Since agricultural residues have relatively low quality fuel properties compared to wood pellets and coal, the fuel properties of the pellets have been improved by the torrefaction method. The obtained pellets were burned in an automatic domestic pellet stove and their combustion performance and flue gas emission values were determined.

According to the results obtained, while the hot steam pelletizing process increased the pellet production capacity by 112% for SD pellets and 50% for ZB pellets. Hot steam conditioning reduced the specific energy consumption during pelletizing, and values of 114.07 kWh/ton in SD and 152.80 kWh/ton in ZB were calculated. Steam conditioning

affected the pellet production parameters and pellet physical properties for both agricultural residues at different levels according to the raw material physical properties and lignocellulosic structure. In general, the increase in the level of hot steam strengthened the bond between the ground particles forming the pellet, allowing denser and durable pellets to be produced. Thus, the highest particle density and bulk density values in SD pellets were calculated as 1395 kg/m³ and 833 kg/m³, respectively. At the most efficient steam level for ZB pellets, the particle density and bulk density values were 1289 kg/m³ and 736 kg/m³, respectively. The improvement effect of steam conditioning on pellet production parameters and pellet physical properties is directly related to the particle size and lignocellulosic content of the ground raw material. The torrefaction of the pellets was carried out in nitrogen environment at 220, 250 and 280 °C temperatures for 15 minutes. While the increased temperature caused an improvement in the fuel properties of the pellets, there was an increase in the physical fragility of the pellets. In addition, the increase in the level of steam conditioning enabled the production of pellets in denser form compared to pelletizing without hot steam. Thus, dense pellets showed resistance to torrefaction. The highest enhancement factors obtained by the torrefaction process were calculated as 1.20 and 1.18 for SD and ZB pellets, respectively. The calorific value of the untreated SD pellets, which was 16.91 MJ/kg, increased to 20.29 MJ/kg with the torrefaction process, and the calorific value increment observed from 17.52 MJ/kg to 20.73 MJ/kg for untreated and torrefied ZB pellets. A high level of correlation ($R^2 \geq 0.90$) was found between the difference in color parameters of the pellets darkening with increasing torrefaction temperature and their torrefaction efficiency.

In the combustion of the pellets, the nylon based hanging twine and plastic clip residues contained in the tomato stem residues caused slaging and clogging in the combustion chamber. In this respect, insufficient air flow caused CO and NO_x emissions to remain at 2363-11616 ppm and 123-296 ppm, respectively. CO and NO_x emissions in ZB pellets were in the range of 764-2353 ppm and 134-206 ppm, respectively. The sulfur content of greenhouse tomato stalks at the level of 0.26-0.44% caused SO₂ release at the level of 35-203 ppm during combustion. During the combustion of ZB pellets, ash accumulation and slagging did not occur in the combustion chamber, and their combustion efficiency is quite superior to SD pellets. Average flue gas temperatures of SD and ZB pellets were 110-213 °C and 198-269 °C, respectively.

The pelletizing characteristics of agricultural residues show differences according to the residue type, ground raw material particle size and the level of hot steam conditioning. In this regard, pelletizing variables should be considered separately according to the residue type for efficient pelletizing of agricultural residues. The torrefaction process, which is used to improve fuel properties, is a promising conversion technology that can be used to improve the fuel quality of agricultural residue pellets. The nitrogen and sulfur contents of fertilizers used in the cultivation of agricultural products directly and indirectly affect the elemental contents and combustion characteristics of biomass fuels obtained from agricultural residues. In addition, foreign materials such as hanging rope and plastic clips, which are obligatory to be used by cultivation methods in greenhouses, have the potential to adversely affect the combustion quality of pellets to be produced from greenhouse residues. In general, the use of agricultural residues as pellet raw materials has a strategic importance in the production of national and local energy

resources. In order to maximize the thermal efficiency of agricultural pellets, studies should be carried out on specific combustion systems and combustion methods.

KEYWORDS: Agricultural residues, biomass, combustion, pelletizing, torrefaction, wood pellet

COMMITTEE: Prof. Dr. Mehmet TOPAKCI

Prof. Dr. Ahmet KÜRKLÜ

Assoc. Prof. Dr. Murat VAROL

Prof. Dr. Türkan AKTAŞ

Prof. Dr. Gürkan Alp Kağan GÜRDİL



ÖNSÖZ

Sanayi devrimi, fosil enerji kaynaklarına sahip ülkelerin enerji egemenliğini tüm dünyaya kabul ettirmiştir. Fakat son yıllarda ülkelerin kendi enerjilerini üretme çabası ve çevresel faktörlere duyarlılık, yenilenebilir enerji alanındaki bilimsel çalışmaları ve sektörel uygulamaları arttırmıştır. Toplumun temel yaşam faaliyetlerini sürdürebilmesi için gerekli olan ısı enerjisi, doğrudan ve dolaylı yoldan yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elde edilmeye başlanmıştır. Bu bakımdan, ülkelerin kendi yenilenebilir enerji kaynaklarını doğru teknolojilerle yakıtla dönüştürebilmesi, toplumun refah düzeyinde ve ülkenin ekonomik varlığında iyileşmeye olanak sağlamaktadır. Kömür, doğalgaz, petrol gibi coğrafi etmenlere bağlı uzun vadede sınırlı enerji kaynakları yerine, tüm ekolojilerde yetişen bitkisel biyokütle kaynakları, sürdürülebilir enerji eldesi için önemli kaynaklardır.

Biyokütle kaynaklarının evsel ısıtma ihtiyacının karşılanması amacıyla pelet yakıtına dönüştürülmesi, hızlı, etkin ve nispeten düşük maliyetli bir yakıt üretim teknolojisidir. Son yıllarda küresel anlamda belirginleşen enerji krizi göstergeleri, evsel ve endüstriyel anlamda pelet yakıtı üretim ve tüketimini arttırmıştır. Genellikle orman ürünlerinin hammadde olarak kullanıldığı odun peletleri, dünya çapında bilinen ve küresel düzeyde ticaret hacmi bulunan yakıtlardır. Artan nüfus ve enerji ihtiyacı, odun peleti tüketimiyle birlikte sınırlı düzeydeki hammaddelerin temin sorunlarını beraberinde getirmiştir. Bu bakımdan, genellikle düşük yakıt özelliklerine sahip olması ve sürdürülebilir lojistik operasyon eksikliği sebebiyle tarımsal artıkların pelet hammaddesi olarak kullanımı kısıtlanmaktadır. Tarımsal artıkların fosil yakıtlar ve odun peletleriyle rekabet edebilmesi için peletlenebilirlik özelliklerinin tanımlanması ve düşük yakıt özelliklerinin çevrim teknolojileriyle artırılması gerekmektedir. Ülkemizde henüz gelişmeye başlayan pelet sektöründe tarımsal artıkların yer edinmesi ve sürdürülebilir pelet üretiminin sağlanması enerji sektörüne katkının yanı sıra dolaylı olarak tarımsal üretimde de iyileşmeye olanak sağlayacağı ön görülmektedir. Ayrıca, yakıt özellikleri iyileştirilmiş tarımsal peletlerin ülkemizde kullanımının yanı sıra, ihracat potansiyeli de bulunmaktadır. Bu çalışmada, tarımsal artıkların endüstriyel pelet üretimine uyarlanabilecek faktörlerle dizayn edilmiş, yakıt iyileştirme teknolojileri kullanılarak peletlerin son kullanıcı açısından verimlilik parametreleri araştırılmıştır.

Uzmanlık alanımda ilerlememde ve bu çalışmadaki katkılarından dolayı, geniş kapsamlı bakış açısıyla bilimsel usul ve esaslarla ufkuma yön veren kıymetli danışmanım Prof. Dr. Mehmet TOPAKCI'ya şükranlarımı sunarım. Çalışmada, tarımsal artıkların elde edilmesi, karakterizasyonu ve ön işlem uygulamalarında yardım ve yönlendirmelerinden dolayı Prof. Dr. Murad ÇANAKCI'ya, elde edilen verilerin istatistiksel analiz ve değerlendirilmesinde Prof. Dr. Davut KARAYEL'e, hammaddelerin lignoselülozik karakterizasyonunda yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Firdevs KORKMAZ TURGUD'a en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tezimin başarısız ve başarılı olan deneysel çalışma süreçlerinde sabır, gayret ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Merve YILMAZ'a ve oğlum Kaan Ekin YILMAZ'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca, mesleki hayatımda başından beri yanımda olduklarını hissettiğim annem, babam ve kardeşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT..... | iv |
| ÖNSÖZ | vii |
| AKADEMİK BEYAN | x |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | xi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xvi |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Dünya’da ve Türkiye’de Enerji İstatistikleri..... | 2 |
| 1.2. Biyokütle Enerjisi | 3 |
| 1.2.1. Biyokütlenin yapısı | 3 |
| 1.2.2. Fiziksel dönüşüm teknolojileri..... | 5 |
| 1.2.3. Termokimyasal dönüşüm teknolojileri | 12 |
| 1.3. Çalışma Hakkında | 14 |
| 2. KAYNAK TARAMASI | 15 |
| 3. MATERYAL VE METOD..... | 20 |
| 3.1. Hammadde | 20 |
| 3.1.1. Hammaddenin peletleme işlemine hazırlanması..... | 21 |
| 3.2. Peletleme Sistemi | 23 |
| 3.2.1. Hammadde deposu | 24 |
| 3.2.2. Peletleme makinesi..... | 25 |
| 3.2.3. Sıcak buhar ünitesi | 27 |
| 3.3. Peletleme İşlemi | 32 |
| 3.3.1. Üretim kapasitesi..... | 32 |
| 3.3.2. Enerji tüketimi..... | 33 |
| 3.4. Torefikasyon Reaktörü..... | 34 |
| 3.4.1. Torefikasyon işlemi..... | 35 |
| 3.5. Hammadde Özelliklerinin Belirlenmesi..... | 38 |
| 3.6. Pelet Fiziksel Kalite Testleri | 39 |
| 3.7. Ultimate (Elementel) ve Proximate (Kısa) Analizler..... | 44 |
| 3.8. Torefikasyon Kalite Parametreleri | 46 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.9. | Peletlerin Yakılması | 46 |
| 3.10. | Bacagazı Emisyonlarının Ölçülmesi | 48 |
| 3.11. | Sonuçların Değerlendirilmesi ve İstatistiksel Analiz | 50 |
| 4. | BULGULAR VE TARTIŞMA | 51 |
| 4.1. | Hammadde Özellikleri | 51 |
| 4.2. | Üretim Kapasitesi ve Enerji Tüketimi..... | 56 |
| 4.3. | Pelet Fiziksel Özellikleri | 63 |
| 4.4. | Pelet Kısa (Proximate) ve Elementel (Ultimate) Analizleri..... | 80 |
| 4.5. | Torefikasyon Verimliliği..... | 82 |
| 4.6. | Pelet Renk Parametreleri..... | 89 |
| 4.7. | Peletlerin Baca Gazı Emisyon Değerleri | 93 |
| 5. | SONUÇLAR..... | 101 |
| 6. | KAYNAKLAR | 106 |
| 7. | EKLER | 124 |
| | ÖZGEÇMİŞ | |

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Zeytin budama ve sera domates artıklarının peletlenmesinde sıcak buhar uygulaması ve pelet torefikasyon işleminin pelet kalite parametrelerine etkisinin belirlenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

13/10/2022

Hasan YILMAZ

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

| | |
|---------|---|
| AB | : Avrupa Birliği |
| ABD | : Amerika Birleşik Devletleri |
| AEBIOM | : European Biomass Association |
| AISI | : American Iron and Steel Institute |
| ASAE | : American Society of Agricultural Engineers |
| BG | : Beygir gücü |
| EJ | : Exajoule |
| HHV | : Üst ısı değeri |
| HRC | : Hardness Rockwell C |
| kb | : Kuru baz |
| LHV | : Alt ısı değeri |
| TJ | : Terajoule |
| Mton | : Mega ton |
| ob | : Orijinal baz |
| ÖET | : Özgül enerji tüketimi |
| TBK | : Teorik buhar kapasitesi |
| TBO | : Teorik buhar oranı |
| TST | : Dakikada tüketilen su miktarı |
| TÜİK | : Türkiye İstatistik Kurumu |
| TÜBİTAK | : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu |
| YB | : Yoğuşan buhar miktarı |
| yb | : Yaş baz |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Biyokütlenin lignoselülozik yapısı | 4 |
| Şekil 1.2. Öğütülmüş biyokütlenin ekstrüzyon sırasında maruz kaldığı kuvvetler ve pelet oluşumu. | 7 |
| Şekil 1.3. Peletleme öncesi hammaddeye sıcak buhar uygulaması | 8 |
| Şekil 3.1. Zeytin budama artıklarının toplanması | 20 |
| Şekil 3.2. Sera domates bitki artıklarının toplanması | 20 |
| Şekil 3.3. Dal Sap Parçalama Makinesi | 21 |
| Şekil 3.4. Yaş Sap Parçalama Makinesi | 21 |
| Şekil 3.5. Doğal kurutma işlemi sırasında parçalanmış a) domates sapı artıkları; b) zeytin budama artıkları | 22 |
| Şekil 3.6. 4 mm elek delik çapında öğütülmüş a) domates sapı artıkları; b) zeytin budama artıkları | 23 |
| Şekil 3.7. Peletleme sistemi | 23 |
| Şekil 3.8. Peletleme sistemine ait hammadde deposu..... | 24 |
| Şekil 3.9. Materyal akış kontrol ünitesinde yer alan a) depo açıklık ayarı motoru; a-1) depo açıklık ayarı kumandası, b) kondisyoner hız kontrol ünitesi, b-1) kondisyoner hız kontrol kumandası | 25 |
| Şekil 3.10. Denemelerde kullanılan peletleme makinesi | 26 |
| Şekil 3.11. Peletleme denemelerinde kullanılan pelet kalıbının teknik resim görünümü | 26 |
| Şekil 3.12. Sıcak buhar jeneratörü | 27 |
| Şekil 3.13. Buhar basıncı/buhar sıcaklığı grafiği..... | 28 |
| Şekil 3.14. Kondisyoner ünitesi | 30 |
| Şekil 3.15. Kondisyoner kalibrasyon eğrisi | 31 |
| Şekil 3.16. Sıcak buharla peletleme sırasında aktif kullanılan buhar noktaları | 31 |
| Şekil 3.17. Enerji analizörü..... | 33 |
| Şekil 3.18. Denemelerde kullanılan torefikasyon reaktörü..... | 34 |
| Şekil 3.19. Torefikasyon reaktörü sıcaklık profilleri | 35 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.20. Elek analizi seti..... | 38 |
| Şekil 3.21. Elektronik kumpas ve hassas terazi | 39 |
| Şekil 3.22. Kurutma fırını ve kül fırını | 40 |
| Şekil 3.23. Pelet dayanıklılık test cihazı | 40 |
| Şekil 3.24. Basınç dayanımı test cihazı | 41 |
| Şekil 3.25. Laboratuvar tipi daneli ürün öğütücü | 42 |
| Şekil 3.26. Renk analiz cihazı ve toz ölçüm aparatı | 42 |
| Şekil 3.27. Ters trinoküler metalurji mikroskobu..... | 43 |
| Şekil 3.28. Ev tipi hava üfleli pelet sobası..... | 47 |
| Şekil 3.29. Pelet yakma fazları | 47 |
| Şekil 3.30. Pelet sobasının a) yakıt besleme periyodu ve b) hava üfleme parametreleri | 48 |
| Şekil 3.31. Yanma denemelerinde kullanılan baca gazı analizörü | 49 |
| Şekil 3.32. Yanma denemelerinde kullanılan pelet sobası ve emisyon ölçüm sisteminin a) şematik görünümü b) baca gazı emisyon cihazının pelet sobasına kurulumu | 50 |
| Şekil 4.1. Öğütülmüş sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının parçacık boyut dağılımları..... | 51 |
| Şekil 4.2. Öğütülmüş a) sera domates bitkisi artıkları b) zeytin budama artıklarının genel ve 3 mm'den büyük partiküllerin mikroskop altındaki görünüşleri | 52 |
| Şekil 4.3. Peletleme sırasında ölçülen kalıp sıcaklıkları..... | 59 |
| Şekil 4.4. Artan buhar düzeyleri (B0, B1, B2, B3) ile peletlenmiş ve artan sıcaklıklarda (T0, T1, T2, T3) torefiye edilmiş sera domates sapı artıkları peletleri..... | 62 |
| Şekil 4.5. Artan buhar düzeyleri (B0, B1, B2, B3) ile peletlenmiş ve artan sıcaklıklarda (T0, T1, T2, T3) torefiye edilmiş zeytin budama artıkları peletleri | 63 |
| Şekil 4.6. Domates sapı peletlerinin kademeli sıcak buhar uygulaması ve torefikasyon sıcaklığına göre değişen nem içerikleri ve boyutları..... | 64 |
| Şekil 4.7. Zeytin budama artığı peletlerinin kademeli sıcak buhar uygulaması ve torefikasyon sıcaklığına göre değişen nem içerikleri ve boyutları..... | 64 |

- Şekil 4.8.** Domates sapı ve zeytin budama artığı peletlerinin parça yoğunluğu ve yığın yoğunluğu değerlerinin **a)** farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, **b)** farklı torefikasyon sıcaklığı için buhar düzeylerine bağlı değişimi... 69
- Şekil 4.9.** Sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerinin mekanik dayanıklılık indekslerinin **a)** farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, **b)** farklı torefikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi 71
- Şekil 4.10.** Buhar düzeyi artışının pelet parça yoğunluğu ve mekanik dayanıklılık indeksi arasındaki ilişkinin **a)** farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, **b)** farklı torefikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi 74
- Şekil 4.11.** Domates sapı ve zeytin budama artığı peletlerinin bası dayanımı değerlerinin **a)** farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, **b)** farklı torefikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi 75
- Şekil 4.12.** Artan buhar düzeylerinde (B0, B1, B2, B3) işlem görmemiş (T0) ve en yüksek torefikasyon düzeyindeki (T3) peletlerin bası dayanımı testi sonrası görünümleri 79
- Şekil 4.13.** Artan sıcak buhar düzeylerinde üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerinin kısa (proximate) analiz değerleri 80
- Şekil 4.14.** Artan buhar düzeyi ve torefikasyon düzeylerine göre **a)** sera domates sapı peletleri **b)** zeytin budama artıkları peletlerinin elementel içeriklerindeki değişim..... 81
- Şekil 4.15.** Artan buhar düzeylerinde üretilen **a)** sera domates sapı artıkları ve **b)** zeytin budama artıkları peletlerinin torefikasyon verimliliklerinin torefikasyon düzeyine göre değişimi 83
- Şekil 4.16.** Artan sıcak buhar düzeylerinde üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletlerinin **a)** artan buhar düzeylerine göre Van Krevelen Diyagramındaki konumu, **b)** artan torefikasyon düzeylerine göre Van Krevelen Diyagramındaki konumu 85
- Şekil 4.17.** Sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletlerinin Net Enerji Yoğunluklarının **a)** farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, **b)** farklı torefikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi 86
- Şekil 4.18.** Sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletlerinin yakıt değeri indeksi değerlerinin **a)** farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, **b)** farklı torefikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi 88
- Şekil 4.19.** Sera domates sapı artıkları peletlerinin L, a, b değerlerinin **a)** 3B koordinat düzlemindeki konumları, **b)** artan buhar düzeyi ve artan torefikasyon sıcaklığına göre değişimi..... 90

| | |
|--|----|
| Şekil 4.20. Zeytin budama artıkları peletlerinin L, a, b değerlerinin a) 3B koordinat düzlemindeki konumları, b) artan buhar düzeyi ve artan torefikasyon sıcaklığına göre değişimi..... | 91 |
| Şekil 4.21. Torefiye edilmemiş (T0) ve artan düzeyde torefiye edilmiş (T1, T2, T3) a) sera domates sapı artıkları ve b) zeytin budama artıkları peletlerin renk farklılık parametrelerinin torefikasyon düzeyi ve buhar düzeyine göre değişimi | 92 |
| Şekil 4.22. Peletlerinin yakılması sırasında ölçülen baca gazı sıcaklıklarının a) sera domates sapı peletleri, b) zeytin budama artığı peletlerinde maksimum, minimum ve ortalama değerleri | 93 |
| Şekil 4.23. Yanma denemelerine ilişkin a) yakma işlemi başlangıcında yanma odası, b) sera domates sapı peletlerinin alev formları ve c) kül kalıntıları, d) zeytin budama artığı peletlerinin alev formları ve e) kül kalıntıları..... | 95 |
| Şekil 4.25. Peletlerinin yakılması sırasında ölçülen karbonmonoksit (CO) emisyonlarının a) sera domates sapı peletleri, b) zeytin budama artığı peletlerinde maksimum, minimum ve ortalama değerleri | 96 |
| Şekil 4.26. Peletlerinin yakılması sırasında ölçülen azotoksit (NO _x) emisyonlarının a) sera domates sapı peletleri, b) zeytin budama artığı peletlerinde maksimum, minimum ve ortalama değerleri | 98 |
| Şekil 4.27. Peletlerinin yakılması sırasında ölçülen kükürt dioksit (SO ₂) emisyonlarının a) sera domates sapı peletleri, b) zeytin budama artığı peletlerinde maksimum, minimum ve ortalama değerleri | 99 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Çizelge 1.1. Türkiye’deki bazı tarımsal ürünlerin artık miktarları ve biyoyakıt potansiyelleri..... | 10 |
| Çizelge 1.2. Türkiye’de örtü altı yetiştiricilikte ortaya çıkan domates, biber ve patlıcan bitkilerinin artık miktarları ve enerji eşdeğerleri..... | 11 |
| Çizelge 2.1. Farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen biyokütlenin torefikasyonu konulu çalışmalardaki torefikasyon koşulları | 17 |
| Çizelge 3.1. Değişken sıcak buhar düzeylerinde hesaplanan buhar parametreleri | 29 |
| Çizelge 3.2. Deneme planı | 37 |
| Çizelge 3.3. Baca gazı analizörünün ölçüm aralıkları | 49 |
| Çizelge 4.1. Sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının lignoselülozik bileşenleri | 56 |
| Çizelge 4.2. Değişken buhar düzeylerinde hammadde sıcaklıkları ve hammadde nem içerikleri..... | 56 |
| Çizelge 4.3. Artan buhar düzeyinde üretilen sera domates bitkisi artıkları peletlerinin peletleme işlemleri sırasında üretim kapasitesi ve enerji tüketimi değerleri | 57 |
| Çizelge 4.4. Artan buhar düzeyinde üretilen zeytin budama artıkları peletlerinin peletleme işlemleri sırasında üretim kapasitesi ve enerji tüketimi değerleri | 57 |

1. GİRİŞ

Enerji, insanlık tarihi boyunca medeniyetlerin hayatta kalmasını, gelişimini ve çöküşünü belirlemiştir (Bermejo 2014). Tarih öncesi dönemde, insan türlerinin temel yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmesi için kullandıkları ilk enerji kaynağı kas gücüdür (Smil 2004). Tarihsel süreçte, gündelik ihtiyaçların karşılanmasında bir enerji kaynağı kullanan medeniyetler hızlı gelişim göstermişlerdir.

Odun ateşinin birincil enerji kaynağı olarak kullanıldığı dönemden fosil yakıtlara geçiş, İngiliz kolonileşmesinin getirdiği ticaret ağı, teknolojik yenilikler ve birincil fosil yakıt rezervlerinin keşfedilmesiyle 1700'lü yılların başında başlamıştır (Solomon ve Krishna, 2011). 1760-1830 yılları arasında başlayan Endüstriyel Devrim, Birleşik Krallık, Avrupa kıtası ve Kuzey Amerika'da etkisini genişleterek endüstriyel üretim ve enerji kullanımına büyük etkide bulunmuştur. Bu dönemde endüstriyel üretim sırasında fosil yakıt kullanımı ile beraber fosil yakıt teknolojileri hızla gelişim göstermiştir. Devam eden tarihsel süreçte, fosil yakıtlar kullanılarak enerji dönüşüm teknolojileri üzerine buluşlar gerçekleştirilmiştir. 1763 yılında James Watt tarafından, kömürün yakılmasıyla elde edilen ısının buhar motorunda mekanik harekete dönüştürülmesi, endüstriyel devrimdeki başlıca teknolojik gelişim olarak kabul edilmektedir. Böylece, buhar motoru imalat, inşaat ve nakliye işlemlerine uyarlanarak kullanımı dünya genelinde yaygınlaşmıştır (Smil, 2004; Solomon ve Krishna, 2011). Bu sayede, kömür, endüstride hızla kullanılmaya başlayan birincil enerji kaynağı konumuna gelmiştir.

19. yy'da dünyanın çeşitli yerlerinde petrol rezervlerinin bulunması, gelişen teknolojik altyapı ile dönüşüm basamaklarını hızlandırmıştır. Yine aynı süreçte, otto ve dizel motorlar icat edilerek fosil yakıt dönüşümüne yeni bir boyut kazandırılmıştır. 20. yy'da enerjisini kömürden alan buhar motorları, yerini likit yakıtla çalışan otto/dizel motorlara bırakmıştır (Solomon ve Krishna 2011b).

Endüstriyel devrimle beraber fosil yakıtların keşfi ve enerji dönüşümü ile kullanışlılığının artırılması, 1700-1900 yılları arasında endüstriyel ve tarımsal üretimin artmasına, yaşam standardında iyileşmeye, dolayısıyla dünya nüfusunda parabolik bir artışa neden olmuştur. Artan nüfus daha fazla enerji kaynağına ihtiyaç duyarak dünya enerji politikalarında köklü değişimi ve yeni enerji stratejilerini başlatmıştır. Bunlardan en belirginini, 1973 yılında başlayan petrol krizidir. 1967 yılında Altı Gün Savaşı olarak bilinen İsrail ve Mısır arasındaki savaşta İsrail'i destekleyen ABD, Birleşik Krallık ve Batı Almanya'ya tekrar OPEC tarafından petrol ambargosu uygulanmıştır (Solomon ve Krishna 2011b). 1973 yılında Petrol İhraç Eden Arap Ülkeleri Birliği (OPEC), batılı ülkelere petrol ihraç etmeyeceğini bildirmiştir. Ambargolardan kaynaklanan enerji krizi sonucunda, ülkeler enerji stratejilerinde değişime giderek enerji ithalatı yerine kendi enerjilerini üretme ve enerji teknolojileri geliştirme çalışmalarına başlamıştır. Nükleer enerji, sürdürülebilir enerji ve yenilenebilir enerji ile ilgili temel teknolojik gelişmeler bu dönemde başlamıştır (Fukasaku 1995; Kemp 2011; Kern ve Smith 2008; Smil 2010). Tarihsel süreçte sıkça görüldüğü üzere, ülkelerin enerji üretimi ve enerji politikaları, kriz ve gelişmişlik durumlarını belirleyen temel faktördür.

1.1. Dünya’da ve Türkiye’de Enerji İstatistikleri

Küresel enerji krizi dönemi ve günümüz enerji istatistiklerine bakıldığında, 1973 yılında 254 EJ olan dünya enerji arzı, 2019 yılında 606 EJ seviyesine ulaşmıştır. 1973’den bu yana en büyük enerji kaynaklarını sırasıyla petrol, kömür ve doğalgaz oluşturmaktadır. Enerji krizi ve yenilikçi yakıt teknolojilerinin gelişmesiyle, 1973’de dünya toplam enerji arzı içinde petrol %46.2, kömür %24.7, doğalgaz %16.1 düzeyindeyken 2019 yılında petrol %30.9’a azalmış, doğalgaz %23.2’ye ve kömür %26.8’e artmıştır. Dünya enerji arzı 1990 yılında 367 EJ iken 2019’a kadar %62 artış göstererek 598 EJ düzeyine ulaşmıştır. Kaynak bazında enerji arzı dağılımına bakıldığında, 2019 yılı itibariyle en büyük pay %31.50 ile petrolde iken, geri kalan %26.85’i kömür, %22.85’i doğalgaz, %9.30’u biyokütle ve %9.50 ile diğer kaynaklar (nükleer, hidrolik, güneş, rüzgâr) oluşturmaktadır (Adrian 2021).

Dünya’da son 30 yılda enerji tüketimi %59 oranında artış göstermiş olup 2019 yılı sonunda 416 EJ enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Kaynak bazında enerji tüketimi değerleri incelendiğinde toplam tüketim değerinin %40.76’sı petrol, %19.31’i elektrik, %16.21’i doğalgaz, %10.01’i kömür %10.19’u biyokütle ve %3.52’si diğer kaynaklardan (ısı, güneş, rüzgâr) elde edilmiştir. Dünyada yaşanan gelişmelere paralel olarak ülkemizde de enerji üretim ve tüketim miktarları son 30 yılda artış göstermiştir. Enerji arzı 1990 yılında 2.2 EJ iken 2019 yılına dek %184 artışla 6.1 EJ düzeyine ulaşmıştır. Dünya’da olduğu gibi birincil enerji kaynaklarından olan kömür ve petrol üretimi ülkemizde de en büyük paya sahiptir. Ülkemizde, 1990 yılında petrol toplam enerji arzının %45.44’ünü oluştururken kömür %30.26’sını, biyokütle %13.99’unu, doğalgaz %5.54’ünü ve diğer kaynaklar (hidrolik, güneş, rüzgâr) %4.76’sını oluşturmuştur (Adrian 2021).

Ekonomik ve sosyal gelişimin artışıyla enerji ihtiyacının da artması, fosil enerji ihtiyacı ve çevresel etki faktörleri ile ekonomik kalkınma arasında ciddi bir çelişkiye yol açmıştır (Tükenmez ve Demireli 2012). Ülkelerin kendi enerjisini üretebilen konumda olması, gelişmişlik ve bağımsızlık durumunu doğrudan ve dolaylı olarak etkilemektedir. Fosil yakıt rezervleri dünya üzerinde coğrafi olarak sınırlı alanlarda yoğunlaşmıştır. Enerji krizinden bu yana gelişen enerji politikaları fosil yakıt işleme ve ticaret ağında bazı sınırlamaları getirmiştir. Bu nedenle ülkelerin kendi yakıtlarını üretme, işleme ve geliştirmenin en etkin yolu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıdır. Günümüzde, fosil yakıtların fiyatları gün geçtikçe artmakta ve dünya üzerindeki kaynakları tükenmektedir. Bundan dolayı kömür ve petrol ürünlerinin yerini tutabilecek, enerji maliyetlerini ve atmosfere salınan zararlı gaz emisyonlarını düşürecek alternatif enerji kaynaklarıyla ilgili araştırmalara ilgi artmıştır (Palsauskas ve Petkevicius 2013).

Yenilenebilir enerji, temel olarak doğal süreçlerle sürekli olarak yenilenen enerji akışları olarak tanımlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal periyodik döngüde oluştuğu için her yıl belirli bir miktar varlığını korumaktadır. Bu nedenle belirli bir dönemde döngüden elde edilen enerji miktarı sonraki dönemlerde döngü hacmini etkilemediğinden tükenme tehlikesi bulunmamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları üç ana başlıkta toplanır. a) Doğrudan kullanılan güneş enerjisi (solar termal enerji dönüşümleri ve solar fotovoltaikler), b) Dolaylı yoldan kullanılan güneş enerjisi (hidrolik, rüzgâr, dalga, biyoenerji, biyokütle), c) Solar radyasyona bağlı olmayan enerji (jelgit, jeotermal enerji) (Hersh 2006).

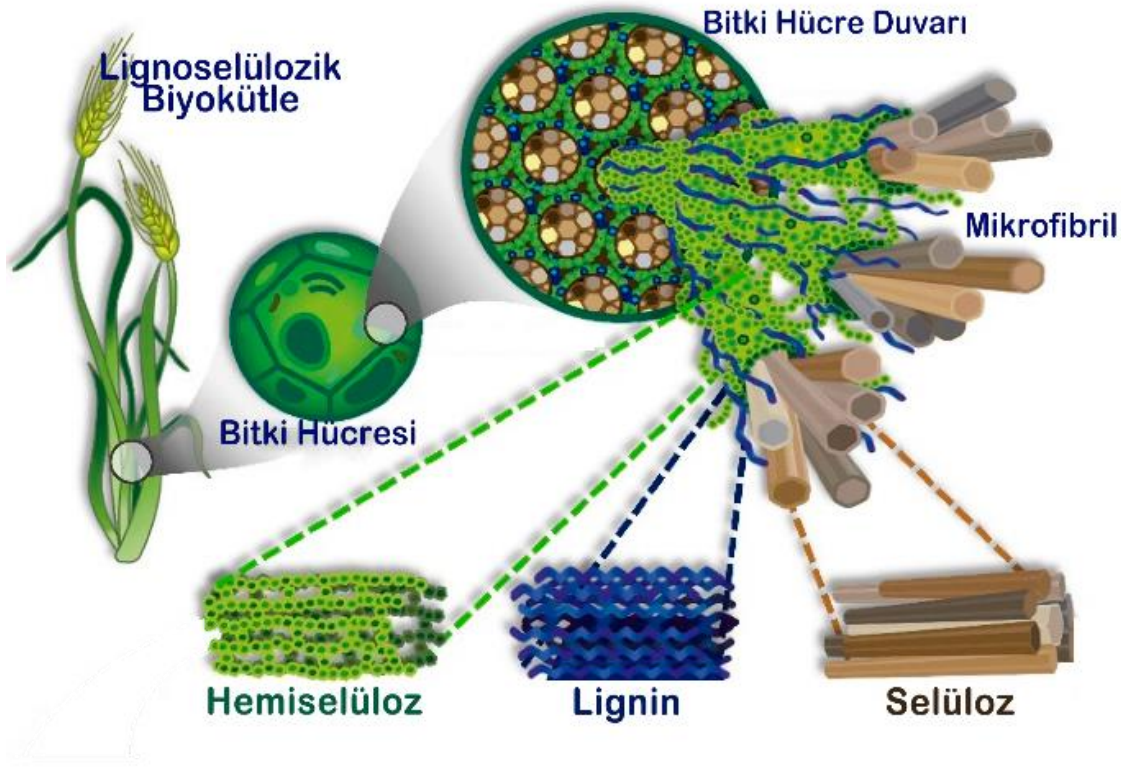
1.2. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, insanlık tarihinin başlangıcından bu yana, ateşin keşfinden itibaren kullanılan bir enerji kaynağıdır. Biyokütle enerjisi, 12. yüzyılda fosil yakıtların keşfine kadar dünya genelinde birincil enerji kaynağı olarak yerini korumuştur (Fekete 2013). Günümüzde biyokütle kaynakları, orman ürünleri artıkları, çeşitli şehir artıkları, peyzaj artıkları gibi üretim sonrası (post-product) artıklardan oluşmaktadır. Atık çeşitliliği ve coğrafi etkenlerden dolayı biyokütle, muazzam kimyasal değişkenliğe sahip karmaşık, doğal ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Biyokütle kaynaklarının dünyanın her coğrafyasında, kendine özgü iklim ve yetiştirme koşullarında ortaya çıkması, biyokütlenin yerli enerji kaynağı hammadde olarak kullanılması kapsamında avantaj sağlamaktadır. Biyokütleden enerji üretimi, basit veya karmaşık teknolojileri içeren yöntemlerin kullanımıyla gerçekleştirilmektedir. Katı yakıt olarak kullanılmak üzere, biyokütle çeşitli fiziksel dönüşümlerden geçerek son kullanıcının taleplerini karşılayan forma dönüştürülebilmektedir.

Biyokütleye uygulanan fiziksel dönüşüm teknolojileri, parçalama, öğütme, peletleme ve briketleme olarak sınıflandırılabilir. Parçalama işlemi, otsu/odunsu uzun dal, ağaç gövdesi, tarla bitkileri artıkları, budama artıkları gibi genellikle bitkisel artıkların çeşitli parçalayıcı makineler vasıtasıyla 1-5 cm boyutlarına getirilmesi işlemidir. Parçalanmış materyal genellikle geleneksel ve endüstriyel yakma sistemlerinde doğrudan ısı eldesi veya termokimyasal dönüşüm hammadde olarak kullanılmaktadır. Öğütme işlemi, parçalanmış biyokütlenin çeşitli çaplarda eleklerle sahip değirmenlerle ince/kalın toz formuna getirilmesini kapsar. Öğütülmüş materyal, sabit/akışkan yataklı yakma sistemleri ve enerji santrallerinde kullanılmakla beraber sıkıştırılarak pelet ve briket formuna getirilip yüksek yoğunluklu katı yakıt elde edilebilmektedir.

1.2.1. Biyokütlenin yapısı

Biyokütlerdeki bitki hücreleri, bitkinin %95'ini oluşturan sert bir hücre duvarı ile çevrilidir. Bitki hücresi, temelde karbonhidratlar (selüloz ve hemiselüloz), lignin, düşük oranda ekstraktif maddeler ve %1'den daha az proteinlerden oluşur (Kerr ve Goring 1975; Phanphanich 2010) (Şekil 1.1). Bitkisel materyali oluşturan üç temel bileşen olan hemiselüloz, selüloz ve ligninin lignoselülozik biyokütle içerisindeki oransal dağılımları genellikle, sırasıyla %15-40, %30-50 ve %10-35 aralığındadır (DoKyung 2007). Bu bileşenler bitkinin hücre duvarını oluşturan, bitkinin fizikokimyasal yapısını belirleyen ve bitkiye sertlik ve dayanıklılık gibi mekanik özellikler kazandıran unsurlardır (Carpita ve MacCann 2000). Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanımı için fiziksel ve termokimyasal dönüşümlere uğraması gerekmektedir. Bitkilerin lignoselülozik yapısının kazandırdığı mekanik özellikler, bitkisel materyale uygulanan fiziksel dönüşümler (parçalama, öğütme, peletleme) ve termokimyasal dönüşümlerin (yanma, piroliz, gazlaştırma) etkinliğini belirlemektedir (Phanphanich 2010; Zheng vd. 2015).



Şekil 1.1. Biyokütlenin lignoselülozik yapısı

Fiziksel dönüşüm açısından değerlendirildiğinde, çeşitli tip parçalayıcı ve öğütücülerle biyokütlenin parçalanması ve öğütülmesini ifade eden boyut küçültme işleminde, lignoselülozik yapı fiziksel parçalanma etkinliği ve parçalama ve öğütme sistemlerinin özgül enerji tüketimini etkileyen başlıca faktördür. Yüksek lignin ve selüloz içeren odunsu yapıların boyut küçültme işlemi, düşük lignin ve selüloz içerikli tarımsal artıklara göre genellikle daha fazla enerji gerektirir (Oyedeji vd. 2020). Peletleme işleminde lignoselülozik yapı hammaddenin peletlenme etkinliğini belirleyen temel unsurdur. Hammaddenin selülozik içeriğinin fazla oluşu, daha sert ve bütüncül bir yapıda olmasına, dolayısıyla peletleme sırasında sıkıştırma işleminin zorlaşmasına neden olmaktadır. Lignin ise sıcaklık ve basınç altında yapışkanlık özelliği artarak partiküller arası oluşan bağı kuvvetlendirir ve peletteki sıkışık formu sağlar (Abedi ve Dalai, 2017; Lisowski, Olendzki, vd. 2019).

Fiziksel dönüşümde olduğu gibi biyokütlenin termal dönüşümünde lignoselülozik yapı dönüşüm etkinliğini belirleyen temel unsurdur. Torefikasyon işleminde, biyokütlenin termal bozunması lignoselülozik yapıdaki kimyasal reaksiyonlar ve sıcaklık aralığına göre ısı/kütle transferinin gerçekleşmesi ile meydana gelir (Mamvura vd. 2018). Moleküler yapıları nedeniyle torefikasyon sırasında yapısal değişim sırası, hemiselüloz>lignin>selüloz olarak tespit edilmiştir (Zheng vd. 2015).

1.2.2. Fiziksel dönüşüm teknolojileri

Biyokütleden enerji elde etmek için hammaddenin yanma, piroliz ve gazlaştırma gibi termokimyasal dönüşüm işlemleri kullanılarak, kimyasal enerji ısı, mekanik veya elektrik enerjisine dönüştürülür. Doğada elde edildiği biçimde, kaba formdaki biyokütlenin yanması düşük yanma veriminin yanı sıra yüksek zararlı emisyon gazlarına neden olmaktadır. Ayrıca, kaba biyokütlenin depolama, nakliye işlemleri ve otomatik yakma sistemlerinde yanma etkinliği verimsizdir. Bu nedenlerden dolayı biyokütlenin parçalama, öğütme gibi boyut küçültme işlemleriyle yüzey alanı artırılarak enerji dönüşüm etkinliği artırılır.

Diğer bir seçenek öğütülmüş biyokütlenin yüksek basınç altında sıkıştırılarak pelet ve briket (ekstrüzyon) gibi yüksek yoğunluklu katı yakıt elde edilmesidir (Demirbas 2004; Oyedeji vd. 2020).

Boyut küçültme işlemi parçalama ve öğütme işlemlerinin tümünü kapsamaktadır. Parçalama işlemi, odunsu ve otsu materyalde değişkenlik göstermekle beraber, kalın gövde ve ince dal gibi akşamların 10-50 mm en, boy ve 5-15 mm yükseklik boyutlarında parçacıklara ayrılmasıdır.

Öğütme, genellikle parçalanmış ve yeteri düzeyde kurumuş biyokütlenin bilyalı, bıçaklı, titreşimli, aşındırıcı veya çekiçli değirmen ile 0.2-2 mm boyutlarına getirilerek yüzey alanının artırılmasıdır. Biyokütleden enerji eldesi amacıyla uygulanan boyut küçültme yöntemlerinin etkinliği değirmen tipine, öğütülecek hammaddenin ve hedeflenen partikül boyutuna, hammadde besleme oranı, hammadde lignoselülozik yapısı ve nem içeriği gibi biyokütlenin karakteristiklerine bağlıdır (Harmsen vd. 2010; Kratky ve Jirout 2011; Sun ve Cheng 2002).

Ekstrüzyon (sıkıştırma/yoğunlaştırma), biyokütlenin düşük yoğunluk ve kaba formunu belirli bir geometrik şekle sahip yüksek yoğunluklu ürüne dönüştürmek için kullanılan bir fiziksel iyileştirme yöntemidir. Ekstrüzyonun bilinen en eski uygulama alanı balyalamadır. Balyalama işlemi, yığın formundaki yem bitkilerinin taşıma, depolama ve hayvan besleme etkinliğini arttırmak için uygulanan bir yöntemdir. Katı biyoyakıt üretimi amacıyla yapılan ekstrüzyon işlemlerinde biyokütlenin kütle yoğunluğu, enerji yoğunluğu ve yığın yoğunluğu artırılarak etkin depolama ve yanma işlemi sağlanır. Peletleme ve briketleme işlemleri, katı yakıt üretimi için kullanılan yaygın ekstrüzyon yöntemleridir. Parçalanmış, kurutulmuş ve ardından öğütülmüş hammadde, uygun nem içeriği, sıcaklık ve basınç altında bir kalıp içerisinde sıkıştırılarak kullanım alanına uygun geometrik özelliklerde katı yakıt elde edilir (Tumuluru vd. 2010).

1.2.2.1. Peletleme

Biyokütle kökenli artıkların katı yakıt formunda, fosil yakıtlara alternatif düzeyde verimli bir biçimde kullanılabilmesi için hammadde, üretim, nakliye ve depolama koşullarının verimliliği artırılmalıdır. Bu nedenle, depolama ve nakliye işlemlerini kolaylaştırmak ve mevcut yakma sistemlerine adapte edilebilmek için yakıtların homojen geometrik şekle sahip olmaları gerekmektedir. Bunun için katı biyokütle artıkları

parçalanıp öğütülerek boyutları küçültülmekte, pelet formuna getirilerek taşıma ve depolama etkinliğinin artırılarak uygun yakma sistemlerinde katı yakıt olarak kullanımı sağlanmaktadır. Biyokütle peletleri, biyokütle kökenli artıkların genellikle 6-8 mm çap ve 3-40 mm boyunda silindirik formda sıkıştırılarak elde edilmesiyle üretilen katı yakıt olarak tanımlanmaktadır (Döring 2013). Klasik biyokütle kullanımıyla karşılaştırıldığında, peletleme işlemi ile hammaddenin yoğunluğu artmakta, taşıma, depolama ve nakliye masrafları azalmakta, boyut ve şekilde homojenlik sağlanmakta, ısı amaçlı kullanımlarda yakma sistemlerine otomatik olarak beslenebilmekte ve böylelikle biyokütle kaynağının daha etkin bir şekilde kullanımı sağlanmaktadır (Holm vd. 2006; S. Mani vd. 2003; Nilsson vd. 2011; Ruiz Celma vd. 2012; Theerarattananoon vd. 2011; Werther vd. 2000; Zamorano vd. 2011).

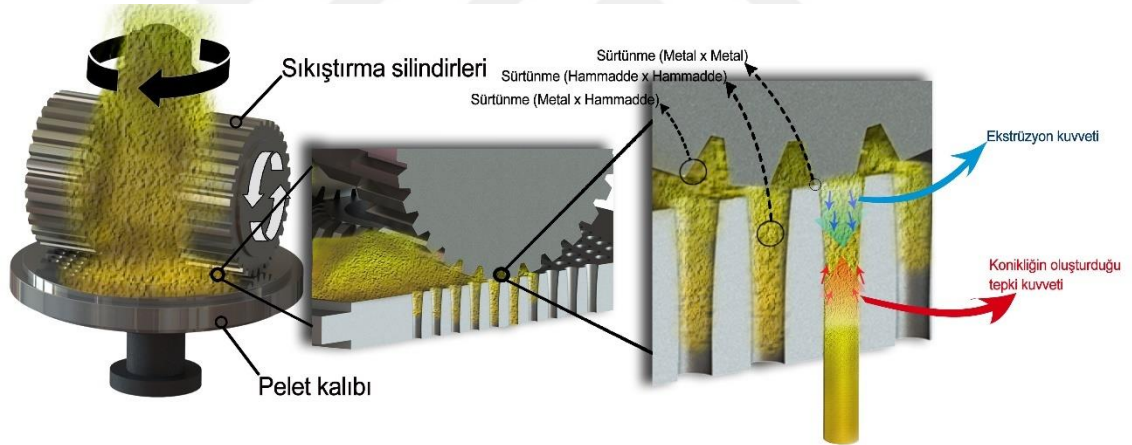
Son yıllarda, biyokütle peletleri dünya çapında artan üretim ve tüketim istatistiklerine sahiptir. 2018 yılının sonunda, dünya çapında odun peleti üretimi 2017'ye göre %14 artarak 55 Mton düzeyine ulaşmıştır. Çin, %36'lık pay ile dünyadaki en büyük pelet üreticisi konumundadır. Çin'i, %30'la AB Ülkeleri, %20 ile Kuzey Amerika ve %14 ile diğer ülkeler takip etmektedir (Calderón vd. 2019).

Pelet küresel pazarına bakıldığında, son yıllarda hızlı bir şekilde büyüme yöneliminde olduğu görülmektedir. Ülkeler bazında pelet sektöründe büyümenin yanı sıra coğrafi olarak da pelet üretim tesisleri çeşitlenmiştir (Thrän vd. 2019). Orman endüstrisinin tüm ülkelerde yaygın olması, sürdürülebilir artık temini ve bilinen yakıt ve peletleme özellikleri nedeniyle biyokütle peletleri genellikle orman ürünleri artıklarından üretilmektedir. Bu nedenle biyokütle peletleri genel bir kavram olarak "odun peleti" (wood pellet) olarak adlandırılmaktadır. Odun peletlerinin yakıt özelliklerinin kömürle rekabet edebilecek düzeyde yüksek kaliteli olması, odun peleti hammaddesi olan orman ürünlerine ilginin bir başka nedenidir (Kusumaningrum ve Munawar 2014). Biyokütle peletleri evsel ihtiyaçların karşılanması amacıyla ev tipi pelet sobalarında yakılmaktadır. Son yıllarda artan pelet üretim endüstrisi, pelet sobası endüstrisinde de gelişmelere neden olmuştur. Dekoratif, kolay kullanıma sahip sobalar üretilerek kullanıcının ısı ihtiyaçlarının yanında konfor düzeyi de önemsenmektedir. Pelet sobaları, evsel ısıtma ihtiyacının giderilmesinin yanı sıra estetik görünüm açısından da kullanıcılar tarafından tercih edilmektedir. Yapılan bir çalışmada, pelet sobası ateşine doğrudan maruz kalanların kan akış seviyeleri, otonom sinir sistemi aktiviteleri iyileşerek zihinsel yorgunluk düzeylerinde düşüş gözlemlenmiştir (Tanaka vd. 2012). Bu bakımdan, pelet kullanımı sadece ısı ihtiyaçların giderilmesinin yanında alışkanlık ve konfor arayışı nedenleriyle de artış göstermektedir. Artan odun peleti talebiyle, hammaddeye talebin hızla artması, hammadde, pelet ve pelet yakma sistemleri fiyatlarında dalgalanmaya sebep olarak sektörde yoğun rekabet ortamı oluşturmuştur. AB ülkelerinde pelet üreticilerinin %42'si odun peleti hammadde fiyatları ve tedarik sorununun pelet üretimindeki en önemli sorunlar olduğunu rapor etmişlerdir (AEBIOM 2017). Nunes vd. (2014), olası bir pelet hammaddesi tedarik krizinde tarımsal artıkların küresel pazarda hammadde olarak kullanılabileceğini bildirmiştir.

Türkiye'de biyokütle peleti sektörü son yıllarda hızlı gelişim göstererek endüstriyel ölçekte pelet üretimi yapan işletme sayısı 2021 yılı itibarıyla 30'a yaklaşmıştır (Karaca 2021). Bu sayı, kayıt altında sertifikalı üreticiler olup, orta ve küçük ölçekli kayıt dışı üretim yapan çok sayıda pelet üreticisi bulunmaktadır. Ülkemizde pelet üreticileri daha çok Akdeniz Bölgesi ve Ege Bölgesi'nde bulunmaktadır ve pelet hammaddesi

olarak dünya çapında olduğu gibi çam ağacı ve diğer orman ürünleri artıklarını kullanmaktadırlar. Ege ve Akdeniz Bölgesi'nde zeytin yetiştiriciliğinin yoğun olması ve bölgesel olarak bulunan zeytinyağı işletmelerinden çıkan pirina artığının pelet hammaddesi olarak kullanılması yaygındır (Karaca 2021). Ülkemizde birçok tarımsal aktivite sonrası ortaya çıkan, pelet hammaddesi olma potansiyeli bulunan tarımsal artıkların oldukça fazla olmasına karşın, tedarik, ön işlem (parçalama/öğütme), peletleme ve yakıt iyileştirme proseslerinin optimize edilmemiş oluşu, sektörün tarımsal artıklara, tüketicilerin ise tarımsal artıklardan üretilen peletlere şüpheyle bakmasına neden olmaktadır. Öyle ki, açık renk orman ürünleri artıklarından üretilen peletlerin sektörde "beyaz pelet" kavramıyla yer edinmiş olması, hammadde çeşidinden kaynaklanan görece koyu renkli peletlerin son kullanıcı tarafından tercih edilmemesine neden olmaktadır.

Pelet üretimi, kaba ve yığın halde bulunan biyokütle kaynaklarının parçalama ve öğütme işlemleriyle boyutlarının küçültülerek, optimum koşullarda dairesel konik delikli kalıplarda sıkıştırılmasıyla gerçekleşir. Peletleme sistemleri, peletleme ünitesinde kullanılan kalıp geometrisine göre düz kalıplı veya dairesel kalıplı olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Hammadde çeşitliliği ve fiziksel yapı farklılığı nedeniyle peletleme işleminin başarılı olabilmesi, temelde hammadde özellikleri ve peletleme sistemi bileşenleri özellikleri olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Pelet oluşumu sırasında pelet kalıbı, sıkıştırma silindirleri ve hammaddenin etkileşimini içeren anlatım Şekil 1.2'de yer almaktadır.

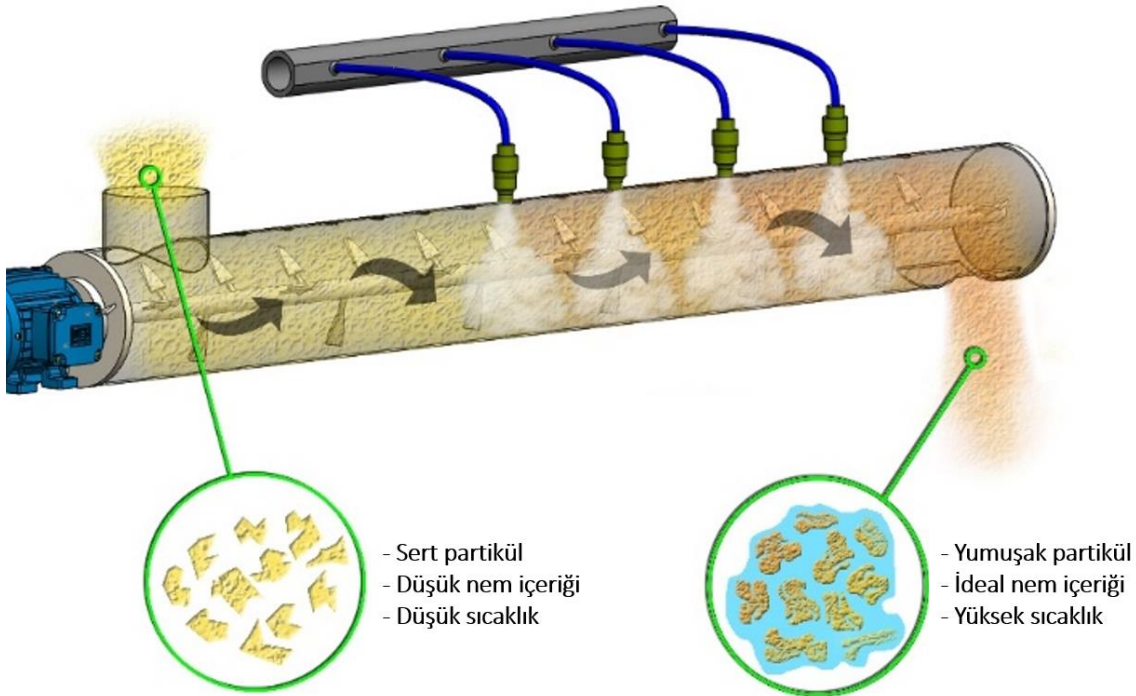


Şekil 1.2. Öğütülmüş biyokütlenin ekstrüzyon sırasında maruz kaldığı kuvvetler ve pelet oluşumu.

Peletleme işleminde temel hedef, öğütülmüş biyokütlenin etkin bir şekilde sıkıştırılması, düzgün silindirik yapıda peletlerin üretildiği süreklilik arz eden peletleme işlemi ve en az enerji tüketerek üretim kapasitesinin maksimize edilmesidir. Biyokütle çeşitliliği ve biyokütlenin karmaşık lignoselülozik yapısı nedeniyle, işletme koşullarına göre ideal peletleme parametreleri, peletleme değişkenlerinin farklı faktörlerle uygulaması yoluyla belirlenir. Yapılan çalışmalarda, peletleme işlemi ve pelet fiziksel özelliklerini etkileyen faktörlerin, öğütülmüş hammaddenin parçacık boyut dağılımı, hammadde nem içeriği, hammadde lignoselülozik yapısı ve kimyasal bileşenleri, pelet kalıbın yapısal özellikleri ve sıcaklığı, uygulanan basınç ve basınca maruz kalma süresi

gibi çok faktörlü etkenlere bağlı olduğu bildirilmiştir (Larsson vd. 2008; Lestander vd. 2012; Samuelsson vd. 2009; Yılmaz vd. 2021a; Yılmaz vd. 2021b).

Sıcak buharla peletleme işlemi, pelet formunda hayvan yemi üretiminde üretim kapasitesinde artış sağlamak ve rasyona dahil olan sıvı formdaki besin ihtiyacının hammaddeye aktarılması için kullanılan bir yöntemdir. Sıcak buhar, peletleme öncesinde hammaddeyi ısıtarak lignin aktivasyonunu kolaylaştırmaktadır. Böylece, pelet kalıbı deliklerinden birim zamanda daha fazla miktarda hammaddenin form kazanması sağlanır. Buharın sağladığı sıcaklık ve nemlendirme işlemi, üretim kapasitesinde artışın yanında pelet makinesinin enerji tüketimini düşürmektedir. Sıcak buharla yumuşayan hammadde aynı zamanda peletleme ünitesi içinde hammadde-metal sürtünmesini azaltarak peletleme ünitesi aksamlarında deformasyonu azaltır. Sıcak buharın peletleme işleminde özgül enerji tüketimini azaltması, pelet yakıtı üreticilerinin kâr maksimizasyonu amaçlarına çözüm niteliği taşımaktadır (Rudolfsson vd. 2020). Bu nedenle endüstriyel ölçekteki peletleme tesislerinde üretim kapasitesi ve pelet makinesi teknik altyapısına göre sıcak buhar (kondisyoner-şartlandırıcı) uygulamaları entegre edilmektedir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Peletleme öncesi hammaddeye sıcak buhar uygulaması

Peletlemede sıcak buhar, özgül enerji tüketimini düşürmesinin yanında, hammaddenin partikülleri arasındaki yapışkanlık özelliği arttırmaktadır. Böylece elde edilen peletlerin daha dayanıklı ve sert yapıda olmasına, hammadde içerisinde var olabilecek salmonella bakterisi, çeşitli mantarlar ve böcek yumurtalarının canlılığının sonlandırılması sağlanmaktadır. Sıcak buhar uygulamasının peletlenebilirlik özellikleri ve pelet kalitesi üzerine olumlu etkileri bulunsa da buhar kaynağının enerji gerektirmesi, pelet tesisindeki kurulum masraflarını ve bakım maliyetlerini arttırmaktadır (Rudolfsson vd. 2020). Diğer yandan, sıcak buharla sağlanan yüksek sıkıştırma oranı ve yüksek üretim

kapasitesi, taşıma, iletim ve depolama süreçlerinin etkinliğini arttırmaktadır (Kaliyan ve Morey 2010; Saha 2010).

1.2.2.2. Peletlemede hammadde çeşitliliği

Fosil yakıt fiyatlarının artışı, biyokütle kökenli artıklara yönelim ve pelet sektöründeki hızlı büyüme, odun peleti hammaddesi olan orman ürünleri üzerinde bir baskı oluşmuştur. Bu durum, değerlendirilebilir düzeyde her yıl ortaya çıkan biyokütle artıklarından olan tarımsal artıklara yönelimi arttırmıştır. Özellikle dünya pelet üretiminde büyük paya sahip ülkeler, pelet hammaddesi olarak tarımsal artıkların kullanılması yönünde projeksiyonlar geliştirmiş ve yenilenebilir enerji kullanım politikalarını bu yönde güncellemiştir. Bu yönelim, sektöre alternatif pelet hammaddesi sağlamanın yanı sıra tarımsal enerji kapsamında bir döngü oluşturma potansiyeline sahiptir (Agar vd. 2018; Civitarese vd. 2019; Pradhan vd. 2018).

Tarımsal artıklara dayalı biyokütle enerjisi üretimi, dünyanın birçok ülkesinde yenilenebilir enerji üretiminde odak noktasındadır. Her yıl oldukça fazla miktarda tarımsal artık, çeşitli tarımsal aktiviteler sonrası ortaya çıkmaktadır. Tarımsal biyokütle, tarımsal üretim çeşidine göre kabuk, kök, sap, kavuz, yaprak, koçan, ince dal gibi farklı bitki aksamlarından veya bunların karışımından oluşabilmektedir (Avcıoğlu, Dayıoğlu, ve Türker 2019). Orman ürünleri ve odunsu biyokütleyle karşılaştırıldığında, tarımsal artıkların genellikle yüksek kül ve nitrojen içeriğine sahip olması düşük yanma verimi ve yüksek baca gazı emisyonlarına neden olmaktadır (Demirbas 2004; Öhman vd. 2004).

Her bir tarımsal ürün artığının lignoselülozik yapısı birbirinden farklı olabildiği gibi, tek bir ürünün sap, kabuk, yaprak gibi aksamalarının lignoselülozik ve kimyasal özellikleri farklılık gösterebilmektedir. Bu yüzden homojen karakteristik göstermeyen tarımsal artıklardan standardize edilmiş bir yakıt üretilmesi veya yakıt hammaddesi olarak kullanılması güçleşmektedir. Ürün bazında ve kendi içinde farklılık gösteren tarımsal artıkların yapısal özelliklerinin değişkenliği, fiziksel ve termokimyasal dönüşüm işlemlerinde bireysel karakteristiklerinin tanımlanması ihtiyacını doğurur.

Tarımsal artıkların biyokütle kaynağı olarak değerlendirilmesi, dünyada olduğu gibi Türkiye’de de akademik araştırmalar ve sektörel uygulamalarda ilgi odağındadır. Tarımsal ürünlerin belirli miktarlarda her yıl üretilmesi ve buna bağlı olarak sap, saman, budama artığı, kavuz, kabuk gibi lignoselülozik artıklarının varlığı tarımsal artıkların biyokütle kaynağı olarak kullanım potansiyelini arttırmaktadır. Türkiye’de mevcut tarım alanları ve üretim deseni dikkate alındığında, tarla bitkileri ve bahçe bitkileri kategorilerinde başlıca yetiştirilen ürünlerden çıkan kuru bazda tarımsal artık miktarı sırasıyla 47.52 Mton/yıl ve 3.67 Mton/yıl’dır (Avcıoğlu vd. 2019).

Türkiye’deki bazı tarımsal artıkların yıllık miktarları tarla bitkileri ve bahçe bitkileri kategorileri altında Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Türkiye’deki bazı tarımsal ürünlerin artık miktarları ve biyoyakıt potansiyelleri

| Ürün | Üretim miktarı (Mton)* | Artık tipi | Nem içeriği (%) | Ürün Artık oranı | LHV, (MJ/kg) | Atık miktarı (Mton, kb) | Kullanılabilirlik (%) | Enerji eşdeğeri (TJ, kb) |
|---------------|------------------------|---------------|-----------------|------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Buğday | 17.94 | Saman | 13 | 1.13 | 16.7 | 17.63 | 15 | 44.17 |
| Şeker pancarı | 18.25 | Yaprak, sap | 75 | 0.13 | 16.6 | 0.59 | 15 | 1.48 |
| Arpa | 6.19 | Saman | 13 | 1.22 | 18.5 | 6.57 | 15 | 18.24 |
| Mısır | 6.88 | Sap, koçan | 16 | 1.88 | 17.0 | 10.86 | 60 | 110.80 |
| Pamuk | 3.08 | Sap | 8 | 0.57 | 15.5 | 6.45 | 60 | 60.00 |
| Ayçiçeği | 2.42 | Sap, yaprak | 9 | 2.30 | 16.4 | 4.62 | 60 | 45.41 |
| Çeltik | 1.00 | Saman, kavuz | 27 | 2.10 | 15.6 | 0.80 | 60 | 7.52 |
| Asma | 3.67 | | 45 | 0.42 | 18.0 | 0.85 | 80 | 12.21 |
| Elma | 4.49 | | 40 | 0.19 | 17.8 | 0.51 | 80 | 7.29 |
| Portakal | 1.74 | | 40 | 0.35 | 18.1 | 0.37 | 80 | 5.30 |
| Zeytin | 1.74 | Budama artığı | 40 | 1.20 | 18.5 | 1.25 | 50 | 11.58 |
| Mandalina | 1.82 | | 40 | 0.29 | 17.6 | 0.32 | 80 | 4.46 |
| Limon | 1.55 | | 40 | 0.30 | 17.6 | 0.28 | 80 | 3.93 |
| Kayısı | 0.80 | | 40 | 0.19 | 20.0 | 0.09 | 80 | 1.46 |

* TÜİK-2022

Tarla birkileri ve meyve ağaçları kategorilerindeki artık tipleri incelendiğinde, tarla bitkileri artıklarının otsu yapıda sap, saman, koçan ve kavuz tipinde artıklardan, bahçe bitkileri artıklarının ise budama sonrası ortaya çıkan odunsu tipte artıklardan olduğu görülmektedir. Üretim alanına göre dikkat çeken diğer bir nokta artıkların kullanılabilirlik miktarlarıdır. Bir tarımsal artığın biyokütle kaynağı olarak sürdürülebilir kullanım miktarını tanımlayan “kullanılabilirlik”, tarımsal artıklardan ürün harici ortaya çıkan bitkisel aksam toplam miktarı içinde, hasat ve toplama sırasında meydana gelen kayıplar ve farklı amaçlar için kullanımı dışında artı kalan ürünün yüzde cinsinden ifadesidir (Milbrant 2005; Alex Marvin 2011). Örneğin, buğday bitkisinin biyokütle olarak kullanılabilirlik oranları %15 iken asmanın budama artıklarının kullanılabilirlik oranı %80’dir. Bu durumun temel sebebi, mevcut buğday samanı varlığının büyük bölümünün sistematik olarak hayvan yemi eldesinde kullanılıyor olması, asma budama artıklarının ise yöresel düzeyde sistematik bir toplama organizasyonu olmadan, temel ısıl ihtiyaçlar için kullanılmasıdır. Bu orandan yola çıkarak, tarımsal artıkların doğrudan ürün/artık oranı veya alan bazında artık miktarı göstergesine göre artık potansiyelinin belirlenmesi yerine, bölgesel bazda uygulamalar ve sosyal alışkanlıklar çerçevesinde kullanılabilirlik oranlarının değerlendirilmesi gerekir.

Verilen başlıca tarımsal artıklar arasında zeytin budama artıkları, üretim miktarı ve ürün artık oranı dikkate alındığında yıllık bazda en çok miktarda artık potansiyeli bulunan bir meyve ağacıdır. Ülkemizde sofralık ve yağlık olmak üzere 889 bin hektar zeytinlik alanından yılda 1.74 Mton ürün elde edilmektedir. Özellikle yaşlı zeytin ağaçlarında dalların güneşlenme alanının artırılması ve verimin yükseltilmesi için zeytin ağaçlarının iki yılda bir budanması gerekmektedir (Rencoret vd. 2019). Yıllık bakım ve budama işlemleri sonrası toplam zeytin alanlarından çıkan artık miktarı yaş bazda 2.04 Mton/yıl, kuru bazda 1.25 Mton/yıl olarak hesaplanmıştır. Toplam zeytin budama artıklarının kuru bazda enerji eşdeğeri yıllık 11.58 TJ düzeyine ulaşmaktadır.

Tarla ve bahçe tarımının yanında ülkemizde oldukça fazla üretim alanı ve ürün miktarına sahip diğer bir üretim şekli örtü altı yetiştiriciliktir. Ülke genelinde alçak tünel, cam sera ve plastik seralarda yapılan sebze tarımında toplam ekili alan 2021 yılı itibariyle yaklaşık 80 bin hektar, toplam üretim miktarı 8.75 milyon ton'dur. Toplam örtü altı yetiştiricilik alanlarının %35.61'inde domates, %13.95'inde biber ve %4.27'sinde patlıcan üretimi yapılmaktadır (TÜİK 2022). Türkiye'de cam ve plastik seralarda örtü altı yetiştiricilik sonrası ortaya çıkan sera bitkisel artık miktarları ve enerji eşdeğerleri Çizelge 1.2'de yer almaktadır.

Çizelge 1.2. Türkiye'de örtü altı yetiştiricilikte ortaya çıkan domates, biber ve patlıcan bitkilerinin artık miktarları ve enerji eşdeğerleri

| Ürün | Üretim alanı (dekar) | Üretim miktarı (ton) | Nem içeriği (%) | Ürün atık oranı* | Isıl değer (MJ/kg, kb)* | Artık miktarı (ton, kb) | Toplam enerji eşdeğeri (TJ) |
|----------|----------------------|----------------------|-----------------|------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Domates | 283,684 | 4,406,920 | 70-80 | 1.07 | 17.12 | 304,393 | 5,211 |
| Biber | 111,110 | 1,129,882 | 60-70 | 0.93 | 17.51 | 103,110 | 1,805 |
| Patlıcan | 33,985 | 388,969 | 60-70 | 0.87 | 17.38 | 29,669 | 515 |
| Toplam | 428,779 | 5,925,771 | - | - | - | 437,172 | 7,532 |

* Ürün atık oranı ile biber ve patlıcan artıklarının ısıl değerleri Bilgin, Ertekin, ve Kürklü (2012)'in çalışmasından alınmıştır.

Ülkemizde örtü altı sebze yetiştiriciliğinde domates, biber ve patlıcan bitkileri toplam örtü altı yetiştiricilik alanı ve üretim miktarı kapsamında diğer ürünlere göre en büyük paya sahiptir. Üretim alanı ve ortaya çıkan atık miktarı gözetildiğinde Türkiye'de domates, biber ve patlıcan seralarından toplam yaklaşık 437 bin ton kuru bazda artık çıkmakta, bu artıkların toplam enerji eşdeğeri yaklaşık 7.5 bin TJ seviyesine ulaşmaktadır. Domates, biber ve patlıcan bitkileri içerisinde üretim alanı, üretim miktarı ve bitki başına düşen artık miktarından dolayı en çok artık potansiyeline sahip ürün domatestir. Ülke genelinde her yıl 304 bin ton kuru bazda sera domates artığı çıkmakta olup, toplam enerji eşdeğeri 5.2 bin TJ seviyesindedir.

Tarımsal üretim sonrası ortaya çıkan tarımsal artıklar genellikle ortaya çıktıkları yerde toprağa karıştırma, yakma veya çöp alanlarına atılmak suretiyle bertaraf edilmektedirler. Mevcut durumda zeytin budama artıkları zeytin bahçesinden uzaklaştırılarak yığın formda yakılarak bertaraf edilmekte veya yörede yaşayanların ısıl ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla ev tipi ocaklarda geleneksel yöntemle yakılmaktadır. Yıllık ortaya çıkan artık miktarı göz önüne alındığında yığın halinde yakılan budama artıklarının çevreye verdiği zarar göz ardı edilemeyecek düzeye ulaşmaktadır. Ayrıca, ısıl ihtiyaçların karşılanması amacıyla yapılan yakma işleminde yüksek nem içeriğine sahip olma ve kaba formda kontrolsüzce yakılma elde edilebilecek ısıl verimi oldukça düşürmektedir. Diğer yandan sera bitkisel artıkları, seracılıkta üretim döngüsünün aksamadan gerçekleşmesi için sezon sonunda doğrudan seradan çıkarılarak çöp yığınları halinde yerel yönetimlerin sağladığı boş alanlara dökülmektedir. Boş alanlarda yığın halinde depolanan sera bitkisel artıkları çürümeye bırakılarak yüksek sıcaklık ve nemli ortam şartlarında kendiliğinden yanma riskiyle karşı karşıya kalmaktadırlar. Ayrıca, sera bitkisel artıklarının yığın formda bertaraf edilmesi çevre sağlığı ve görünümü açısından olumsuzluk yaratmaktadır.

1.2.3. Termokimyasal dönüşüm teknolojileri

Biyokütlenin enerjiye dönüşümünde uygulanan başlıca yöntem yakmadır. Doğal formda doğrudan yakma işlemi genellikle kırsal bölgelerde ısı eldesi için kullanılmaktadır. Doğal halde yığın ve kaba formda bulunan bitkisel artıklar yüksek nem içeriği ve düşük yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle geleneksel yakma yöntemleriyle doğrudan yakılması verimsiz yanmaya, buna bağlı olarak yüksek miktarda zararlı emisyon gazlarının açığa çıkmasına ve çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Doğal formda düşük yığın yoğunluğu ve yüksek nem içeriği, biyokütlenin depolama, nakliye etkinliği ve yanma verimliliğini düşürmektedir.

Biyokütle kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması, ekonomik değerinin ve enerji verimliliğinin artması için fiziksel ve termal dönüşüm işlemleri kullanılarak yakıt iyileştirme teknolojileri geliştirilmiştir.

Tercih edilen kullanım alanına göre fiziksel dönüşüme tabi tutulan biyokütle kaynağı, farklı fazlarda yakıt elde etmek üzere biyokütle çevrim işlemlerine tabi tutulur. Biyokütle çevrim teknolojileri, biyokütleyle uygulanan işlem basamakları ve elde edilen ürünlere göre sınıflandırılmış olup “biyokimyasal dönüşüm” ve “termokimyasal dönüşüm” olarak ikiye ayrılmaktadır. Biyokimyasal dönüşüm süreçleri, biyokütlenin anaerobik koşullar altında enzimatik olarak parçalanmasının sonucu biyogaz, etanol ve hidrojen üretilmesi işlemi kapsar (Orak Yeter 2005). Termokimyasal dönüşümler ise genel anlamda ham biyokütle veya parçalanmış-öğütülmüş-peletlenmiş biyokütle ürününe uygulanarak, biyokütlenin kimyasal enerjisini ısı enerjisine dönüştürme amacıyla gerçekleştirilen, farklı fazlarda yakıt üretmek veya mevcut formdaki biyokütlenin ısıl değerini arttırmak gibi kalite parametrelerini iyileştirmek adına yararlanılan bir teknolojidir. Temel amacı endüstriyel ve evsel kullanım alanlarında ısı enerjisi elde etmek olan termokimyasal dönüşüm işlemleri “yanma”, “gazlaştırma” ve “piroliz” olarak genel başlıklar altında üçe ayrılmaktadır.

1.2.3.1. Yanma

Yanma biyokütlerdeki karbon oksitlenerek karbondioksit, hidrojen oksitlenerek suyun oluştuğu bir dizi kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği enerji dönüşüm biçimidir. Biyokütle doğrudan yakılarak biyokütle içerisindeki kimyasal enerji termal, mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülür. Nem içeriği %50'nin altında olan hemen hemen tüm biyokütle türlerinin yakarak değerlendirilmesi mümkündür. Fakat direkt yanma işlemi, biyokütlenin yüksek nem içeriği, yığın formda ve düşük yoğunlukta olmasından dolayı zararlı gaz emisyonlarının yüksek oranda atmosfere karışmasına neden olur (Demirbas 2004; Goyal, Seal, ve Saxena 2008). Biyokütlenin kurutularak nem içeriğinin düşürülmesi, yanma işlemi için uygun koşulları sağlasa da kurutma işlemi biyokütlerdeki organik uçucu maddelerin uzaklaştırılması için etkili olmamaktadır (Joshi 2015).

1.2.3.2. Gazlaştırma

Gazlaştırma, biyokütleyle 500-1300 °C sıcaklık düzeyinde uygulanan ısıl işlem sonucunda yüksek hidrojen içerikli ve yüksek ısıl değere sahip sentez gazı elde edilmesi işlemidir (Basu, 2018). Sentez gazı, hidrojen, metanol, sentetik doğal gaz ve dimetil eter üretiminde kullanılmaktadır (de Sales vd., 2017). Gazlaştırma işleminde genellikle sabit yataklı, akışkan yataklı, sürüklenen akışlı gazlaştırıcılar kullanılmaktadır (Sikarwar vd., 2016). Katı biyokütlenin gaz formuna dönüşmesinde üç temel amaç bulunmaktadır. Bunlar, biyokütle içeriğindeki yanmayan azot ve suyun uzaklaştırılması, yandığında gazlaştırılmış yakıttan atmosfere salınmayacak kükürt ve azotun uzaklaştırılması ve yakıtın karbon/hidrojen oranının düşürülmesidir. Aynı zamanda, biyokütlenin gazlaştırılmasında yakıt içerisindeki oksijen uzaklaştırılarak yakıtın enerji yoğunluğu artırılır. Örneğin, biyokütle %40-60 düzeylerinde oksijen içerirken, kullanılabilir gaz yakıtın oksijen düzeyi oldukça düşüktür (%0-2.3). Gazlaştırma işleminde biyokütleden oksijenin dehidrasyon ve dekarboksilasyon ile uzaklaştırılmasıyla yüksek H/C oranına sahip yakıt atmosfere daha az sera gazı emisyonu yayan bir forma dönüşür (Basu, 2018).

1.2.3.3. Piroliz

Piroliz, biyokütlenin termal bozunması olarak tanımlanır ve katı biyokütlenin oksijensiz ortamda, 350-700 °C sıcaklık aralığında, farklı basınç ve maruz kalma süresi değişkenleriyle katı, sıvı ve gaz formunda yakıtın üretildiği bir dönüşüm teknolojisidir. Piroliz işlemi, temelde ısıtma hızına, kullanılan reaktör çeşidi ve işletme parametrelerine göre yavaş, hızlı ve flaş piroliz kategorilerine ayrılmaktadır. Yavaş piroliz, 5-7 °C/dakika ısıtma hızında, az miktarda gaz ve sıvı ürün, çok miktarda katı ürünün elde edildiği piroliz çeşididir. Hızlı pirolizde ısıtma hızı 300 °C/dakika düzeyine ulaşabilmektedir. Hızlı pirolizde oldukça az miktarda katı üründen yüksek kaliteli sıvı biyoyakıt elde edilir. Flaş pirolizde tüm reaksiyon genellikle birkaç saniyede (30 ms - 1.5 s), 900 °C'ye varan sıcaklıklarda gerçekleşir. Flaş pirolizde 105-250 µm partikül boyutlarındaki biyokütle için özel olarak tasarlanmış akışkan yataklı reaktörler kullanılmaktadır (Çabuk 2019; Demirbas 2004; Goyal vd. 2008).

1.2.3.4. Torefikasyon

Torefikasyon, biyokütle ürününden oksijen ve diğer uçucu maddelerin uzaklaştırıldığı, biyokütlenin yığın yoğunluğu ve enerji yoğunluğu ile birlikte, taşıma ve depolama etkinliğini de artıran bir uygulamadır (Nhuchhen vd. 2014; Peng vd. 2012; Pirraglia vd. 2013; Sjaak ve Koppejan, 2016; Stelte, Clemons, vd. 2011; van der Stelt vd. 2011). Torefikasyon işlemine uğramış biyokütle ürünü, aynı zamanda “yeşil kömür, biochar, charcoal, biocoal” olarak da bilinmektedir (Strandberg 2015). Torefikasyon işleminde uçucu maddeler ve bazı partiküller biyokütleden uzaklaşmaktadır. Bu işlem sırasında biyokütle içindeki uçucu madde miktarına, torefikasyon sıcaklık ve işlem süresine bağlı olarak birim kütlede %30'a varan azalma meydana gelmektedir. Genel anlamda incelendiğinde, ham biyokütle materyali veya peletlere uygulanmış torefikasyon

işlemi sonrası biyokütle ürününün ısı değerlerinde %30'a varan artışların olduğu görülmektedir (Joshi 2015; Ren vd. 2012; Rokni vd. 2018; Yoshida vd. 2015).

Biyokütle lignoselülozik bileşenlerden oluşması nedeniyle karmaşık bir yapıya sahiptir (Ren vd. 2013). Biyokütle içeriğindeki lignoselülozik yapının termal bozunmaya uğraması orijinal biyokütlenin temel yapısı ve bileşenlerinde değişikliğe yol açar (Chen vd. 2018; Prins vd. 2006). Bu bakımdan, biyokütlenin torefikasyon dinamikleri, işlem görmemiş biyokütle özelliklerine göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir (Chen vd. 2021)

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Sıcak buharla peletleme işlemi, pelet formunda hayvan yemi üretiminde üretim kapasitesinde artış ve rasyona dahil olan sıvı formdaki besin ihtiyacının hammaddeye aktarılması için getirilen bir inovasyondur. Katı yakıt üretimi amacıyla yapılan peletleme işleminde sıcak buhar kullanımı peletleme işlemini kolaylaştırmakta ve üretim kapasitesinde artış sağlamaktadır. Genel anlamda kabul gören bu uygulama endüstriyel ölçekli işletmelerde odun talaşı hammaddesinin peletlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat tarımsal artıkların birbirinden farklı fiziksel özellikleri ve lignoselülozik yapısı, gelenekselleşmiş peletleme operasyonlarının ve sıcak buhar kullanımı gibi ön işlemlerin ideal parametrelerinin belirlenmesi ihtiyacını doğurmaktadır.

Biyokütle peletlerinin yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılan torefikasyon teknolojisi, çeşitli biyokütle kaynaklarının odun peletleri ve kömüre kıyasla görece yetersiz ısı değerlerini arttırmak için kullanılan umut vadeden bir iyileştirme işlemidir. Genellikle düşük ısı değere sahip tarımsal artıkların torefikasyon teknolojisiyle yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi, tarımsal artıkların değerlendirilebilme potansiyelini arttırmaktadır.

Bu çalışmada, tarımsal artıkların fiziksel çeşitliliği göz önüne alınarak seçilen, otsu yapıda gövde ve aksamına sahip domates bitkisi (*Solanum lycopersicum*) artıkları ve odunsu yapıda kalın dal, ince dal ve kısmen yaprak içeren zeytin ağacı (*Olea europaea L.*) budama artıkları pelet hammaddesi olarak kullanılmıştır. Sıcak buhar kullanımının otsu ve odunsu yapıdaki tarımsal artıklarda pelet kalitesi ve peletleme parametrelerine etkisini belirlemek amacıyla peletleme işlemlerinde değişken kademelerde sıcak buhar uygulaması yapılmıştır.

Değişken sıcak buhar düzeylerinde üretilen sera domates sapı ve zeytin budama artığı peletlerine artan sıcaklıklarda torefikasyon uygulaması yapılarak hammadde ve sıcak buhar düzeyine bağlı torefikasyon davranışları ve pelet kalite parametrelerine etkisi araştırılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Yapılan çalışmalarda, birincil hammadde olan orman ürünleri ve diğer biyokütle kaynaklarından üretilen peletlerin pelet üretim parametreleri, pelet fiziksel dayanıklılık iyileştirmeleri ve yakıt özelliklerinin iyileştirilmesiyle ilgili çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır.

Biyokütle peletlerinde pelet kalitesinin maksimize edilmesi için, hammadde özellikleri (parçacık boyutu, lignin ve ekstraktifler, nem içeriği, protein, lif), ön işlem uygulamaları (sıcak buhar, ön ısıtma, yapıştırıcı) ve peletleme ekipmanları (basınç, kalıp ve sıkıştırma silindiri özellikleri) parametrelerinin optimize edilmesi ve birbiriyle uyumluluk içerisinde olması gerekmektedir (Kaliyan ve Vance Morey 2009).

Peletleme nemi düzgün silindirik yapıda ve dayanıklı pelet üretimi için optimize edilmesi gereken temel parametrelerden biridir. Zvicevičius vd. (2018), *Artemisia dubia* bitkisi ile %5-25 hammadde nemi aralığında yaptığı peletleme işleminde en dayanıklı peletlerin %5-10 hammadde nemiyle üretildiğini bildirmiştir. Moliner vd. (2020), çeltik bitkisi artığı olan çeltik sapı ve çeltik kavuzunun %10-14 nem içeriği aralığında peletlenmesiyle çeltik sapı peletlerinin yüksek dayanımda, çeltik kavuzu peletlerinin ise mekanik dayanıklılık indekslerinin standart altında kaldığını bildirmiştir. Pegoretti Leite de Souza vd. (2021), lignoselülozik yapının peletleme işlemindeki önemine değinerek, çeşitli biyokütle materyallerinin peletlendiği çalışmada yüksek lignin içeriğinin peletlere daha dayanıklı bir yapı kazandırdığını bildirmiştir.

Peletlenecek ürünün hammadde parçacık boyutu ile ilgili, Harun ve Afzal (2016) odunsu biyokütelerde materyal parçacık boyutunun azalmasıyla pelet yoğunluğunun ve pelet mekanik dayanıklılığının arttığını bildirmiştir. Stelte vd. (2012), briketleme işleminde hammadde parçacık boyutu tolere edilebilirken, peletleme işleminde kullanılan hammaddelerin genellikle 5 mm'den küçük elek delik çaplarında öğütüldüğünü bildirmiştir. Yazar ayrıca, parçacık boyut dağılımında 0.5 mm'den küçük partiküllerin çoğunluğu oluşturması durumunda peletleme işleminde sürtünmenin artacağı, bu durumun pelet kalitesine olumsuz yansıtacağını bildirmiştir.

Tarımsal artıkların pelet hammaddesi olarak kullanımı birçok araştırmacı tarafından ele alınmış ve peletleme parametreleriyle pelet kaliteleri üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Tarımsal artıkların ortaya çıktığı alan ve buna bağlı olarak ortaya çıkan atık miktarı doğrultusunda, araştırmacılar genellikle tarla bitkileri artıkları üzerine çalışmalar yürütmüştür. Bunlardan bazıları, mısır sapı ve mısır koçanı (Theerarattananoon vd. 2011; Tumuluru, 2014; Wongsiriamnuay ve Tippayawong, 2015), buğday samanı (Azócar vd. 2019; Si vd. 2016; Zhang vd. 2017), arpa samanı (Adapa vd. 2013; Emami vd. 2014; Serrano vd. 2011), arpa ve yulaf (Abedi ve Dalai, 2017; Adapa vd. 2010; Alarcon vd. 2017) ve kolzadır (Carroll ve Finnan 2012; Niedziółka vd. 2015). Picchio vd. (2020) tarımsal artıkların düşük yığın yoğunluğu, düşük ısı değer ve yüksek kül içeriğine sahip olmaları nedeniyle ana birincil pelet hammaddesi yerine değişken oranlarda karışım ürünü olarak kullanılabilirliğini önermektedir.

Sıcak buharlı peletleme işlemi biyokütle peleti üretiminde yaygın olmasına karşın sıcak buhar kullanımının peletlemeye ve pelet kalitesine etkisinin araştırıldığı çalışmalar genellikle yem peleti alanında yapılmıştır.

Antane ve Blumberga (2017), odun talaşının peletlenmesi işleminde hammaddeye 120-130 °C’de sıcak buhar uygulaması yapılması gerektiğini bildirmiştir.

Behnke (2019), pelet üretimi esnasında pelet kalitesine müdahalenin pelet kalıbında değil, kondisyoner bölgesinde başladığını belirtmiştir. Sıcak buhar uygulamasının, pelet makinesinde pelet üretimi için gerekli olan sıkıştırma kuvveti gereksinimini ve enerji tüketimini azalttığını, üretim kapasitesini arttırdığı, buna bağlı olarak işçilik maliyetlerini, pelet kalıp-silindir bakım maliyetini ve enerji tüketimini azalttığı bildirmiştir. (Briggs vd. 1999) ve (Skoch vd. 1981)’a göre, peletleme sırasında sıcak buhar uygulaması, sıcak buharsız peletlemeye göre üretim kapasitesini %64 ve pelet dayanıklılığını %26 arttırmaktadır. Sıcak buharsız peletlemede, soğuk hammaddenin pelet kalıp sıcaklığını 5 °C düşürdüğü tespit edilmiştir. Buna karşılık, sıcak buhar uygulanan ürünün pelet kalıbına girmesiyle pelet kalıbında 42 °C lik bir artış gözlemlenmiştir (Skoch vd. 1981).

Skoch vd. (1981), endüstriyel ölçekte pelet formunda hayvan yemi üretiminde hammadde sıcaklığını iki düzeyde sıcak buhar uygulaması ile 65 °C ve 80 °C’ye yükseltmiştir. Birinci düzey ve ikinci düzey buhar uygulamalarında üretim kapasiteleri sırasıyla 1636 ve 1800 kg/h olarak hesaplanmıştır.

Evans vd. (2021) pelet formunda hayvan yemi üretiminde, endüstriyel ölçekte bir pelet makinesi ve sıcak buhar ünitesi ile 74 °C ve 85 °C hammadde sıcaklıklarında pelet üretimi gerçekleştirmiştir. Hammadde sıcaklığına göre üretim kapasitesinde istatistiki açıdan bir değişim gözlemlenmezken, 74 °C ve 85 °C’de üretilen peletlerin mekanik dayanım indeksleri sırasıyla %83 ve %91 olarak hesaplanmıştır.

Larsson vd. (2008) ve Thomas vd, (1998), peletleme işleminde basınçlı sıcak buhar uygulamasıyla öğütülmüş hammaddenin porozitesinin azaldığını ve elde edilen peletlerin sertliğinin arttığını bildirilmiştir. Larsson vd. (2008), pelet kalıbına iletilen hammaddenin besleme problemlerinin ortadan kalkması ve homojen bir biçimde besleme sağlamak için peletleme sırasında sıcak buhar uygulamasını önermektedir.

Kulig ve Laskowski (2008), çeşitli tarımsal artıkların peletlenmesi işleminde, endüstriyel ölçekli bir peletleme makinesi ve sıcak buhar ünitesiyle 2-4 bar arası buhar basıncında peletleme işlemi gerçekleştirmiştir. Buhar basıncı düzeyinde göre hammadde sıcaklığı 50-90 °C arasında değişirken, hammadde nem içeriği %14-22 aralığına ulaşmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, sıcak buharlı peletleme işleminde kalıpla hammadde arasındaki sürtünme kuvveti azalarak peletleme için gerekli enerjide düşüş gözlemlenmiştir. Peletleme enerjisindeki düşüş hammadde sıcaklığının 70 °C ve üstünde olduğu uygulamalarda geçerlidir. Yüksek lifli materyalden elde edilen peletlerde lifli materyalin kalıp ve silindirlerde neden olduğu sürtünme nedeniyle pelet sıcaklığında artış gözlemlenmiştir. Araştırmacılara göre, hammadde sıcaklığı peletleme sırasındaki enerji tüketiminin düşürülmesinde önemli bir parametredir.

Biyokütle torefikasyonu, dünya genelinde kabul görmüş ve biyoyakıt üretim tesislerinde kullanılan bir teknolojidir. Bölgesel olarak yüksek miktarda artık potansiyeli bulunan bir biyokütle kaynağından elde edilen peletlerin yanma özelliklerinin iyileştirilmesi için torefikasyon işleminden faydalanıldığı bildirilmektedir (Beets 2017).

Torefikasyon işlemi, hammaddeye ısı işlem uygulanarak oksijen ve diğer uçucu maddelerin uzaklaştırılmasıyla yığın yoğunluğu ve enerji yoğunluğunda artış sağlar (Peng 2012; van der Stelt vd. 2011).

Torefikasyon koşulları, biyokütlenin fiziksel formu, reaktör tasarımı, reaktör kapasitesi, azot gazı akış miktarı, ortam basıncı ve ısıtma kapasitesine göre değişmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından farklı fiziksel formlardaki çeşitli biyokütle kaynaklarıyla ilgili yapılan torefikasyon çalışmalarına ait bazı bilgiler Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen biyokütlenin torefikasyonu konulu çalışmalardaki torefikasyon koşulları

| Hammadde | Yakıt formu | Sıcaklık (°C) | Ortam basıncı | Gaz | İşlem süresi | Kaynak |
|---|---------------------------|---------------|-----------------------|----------------------------------|--------------|-----------------------------------|
| Sarı kavak, kırmızı akçaağaç, kömür ve karışım ürünleri | <1mm öğütülmüş | 300 | Atmosferik | Nitrojen | 1 saat | (Singh ve Zondlo 2017) |
| İskoç çamı | <40x30 mm Yonga | 291-315 | 0.1-0.15 mbar | Nitrojen | 6-12 dakika | (Rudolfsson vd. 2017) |
| Orman endüstrisi yonga atıkları | 5mm yonga, <1mm öğütülmüş | 230-290 | Atmosferik | Argon | 1 saat | (Magdziarz, Wilk, ve Straka 2017) |
| Mısır sapı, çeltik sapı, kömür | Öğütülmüş | 270 | Atmosferik | Nitrojen | 30 dakika | (Ren vd. 2017; Rokni vd. 2018) |
| Orman ürünü atıkları | Pelet | 160-220 | Atmosferik | Belirtilmemiş (Oksijensiz ortam) | 1-3 saat | (Spırchez vd. 2017) |
| Kızılağaç, palmye çekirdeği ve kabuğu, söğüt yongaları | 0.2-1.18 mm öğütülmüş | 350 | Atmosferik (0.8-1 Pa) | Düşük oksijen içerikli ortam | 10 dakika | (Tymoszuk 2017) |
| Kök nar talaşı | Pelet | 250-300 | Belirtilmemiş | Nitrojen | 10-20 dakika | (Ren vd. 2012) |
| Okaliptus ağacı | Yonga | 220-300 | Atmosferik | Nitrojen | 10-20 dakika | (da Silva vd. 2017) |
| Çam | Yonga | 225-300 | Atmosferik | Nitrojen | 30 dakika | (Phanphanich ve Mani 2011) |
| Pamuk sapı, şeker kamışı, prosopis bitkisi | Belirtilmemiş | 300 | Atmosferik | Belirtilmemiş | 1 saat | (Patel vd. 2011) |

Biyokütlenin enerji içeriğini iyileştirmek için uygulanan bir ön işlem olan torefikasyon işleminde, sıcaklık düzeyi 200-350 °C arasında değişirken, uygulama süresi ise birkaç dakikadan birkaç saate kadar çıkmaktadır. İşlem, genellikle atmosfer basıncında gerçekleştirilirken, oksijensiz ortamda biyokütlenin yakılması olarak da ifade edilmektedir (Chen vd. 2011; Medic 2012; Strandberg 2015).

Farklı markalardaki ticari odun peletleri zayıf oksijenli ortamda, 160, 180, 200 ve 220 °C’de 1, 2 ve 3 saat bekleme sürelerinde torefiye edilmiştir. Çalışma sonunda, işlem uygulanmayan peletlere göre torefiye edilmiş peletlerde %22’ye varan ısı değer artışı gözlemlenmiştir. Torefikasyon işleminin peletler üzerindeki olumsuz etkisi olarak, 220 °C’de 3 saat bekleme süresinde peletlerin kırılabilirliklerinin arttığı bildirilmiştir (Spîrchez vd. 2017).

Biyokütle peletlerine uygulanan torefikasyon işlemi sonucunda pelet nem içeriğinde azalma, ısı değer artışı, uçucu maddelerin azalması, yığın yoğunluğunda artış, nem alma direncinde artış, taşıma koşullarında iyileşme ve nakliye masraflarında azalmanın olduğu bildirilmiştir (Kumar vd. 2017). Kymäläinen vd. (2015), torefiye edilmiş odun peletlerinin, işlem görmemiş peletlere göre 5 aylık depolama süreci sonunda daha dayanıklı olduklarını gözlemlemiştir.

Ghiasi vd. (2014) tarafından peletlerin fiziksel özellikleri ve yanma karakteristiklerin torefikasyon yoluyla iyileştirilmesine yönelik iki önerme yapılmıştır. Bunlardan birincisi peletleme işleminden önce öğütülmüş ürünün torefikasyonu; ikincisi peletleme işleminden sonra peletlerin torefikasyon işlemine tabi tutulmasıdır. Her iki durumdaki peletler karşılaştırıldığında, peletlere torefikasyon işlemi uygulamasının pelet üretim zincirindeki enerji tüketimi, pelet yanma karakteristikleri ve pelet fiziksel özellikleri bakımından avantajlı olduğu sonucuna varmıştır.

Rokni vd. (2018)’nin çalışmasında, mısır sapı ve çeltik kavuzuna 270 °C ve 30 min süreyle uygulanan torefikasyon işlemi sonucunda ısı değerinin mısır sapı için 16.8 MJ/kg’dan 19.4 MJ/kg’a, çeltik kavuzu için 14.7 MJ/kg’dan 16.1 MJ/kg’a arttığı bildirilmiştir.

Biyokütle peletlerine uygulanan torefikasyon işlemi sonucunda pelet nem içeriğinde azalma, ısı değer artışı, uçucu maddelerin azalması, yığın yoğunluğunda artış, nem alma direncinde artış, taşıma koşullarında iyileşme ve nakliye masraflarında azalmanın olduğu bildirilmiştir (Patel vd. 2016). Li vd. (2012), torefikasyon uygulanmış peletlerin sertlik ve nem alma kabiliyetlerinin işlem görmemiş peletlere kıyasla daha az olduğunu bildirmiştir.

Ticari olarak kullanılan ve köknar ağacından elde edilmiş odun peletleri azot gazı ortamında, 200, 230, 250 °C sıcaklıklarda ve 7 – 15 dakika işlem sürelerinde torefiye edilmiştir. Yapılan denemelerde işlem görmemiş odun peletlerin ısı değerinin 18.7 MJ/kg, torefiye edilmiş peletlerin ısı değerlerinin ise 19-23 MJ/kg aralığında olduğu belirlenmiştir. Torefikasyon sıcaklığı ve işlem süresinin, pelet renkleri üzerinde ayırt edilebilir nitelikte farklılıkta olduğu ve pelet renginin koyulaşmasıyla ısı değerinin de arttığı bildirilmiştir (Brachi vd. 2018).

Palmiye yan ürünlerinden olan palmiye boş meyve demeti (PBMD), palmiye yaprağı (PY), palmiye meyve kabuğu (PMK), palmiye meyve posası (PMS) nin biyokütle kaynağı olarak kullanıldığı çalışmada, kurutulup öğütülen her bir materyalden pelet üretilmiştir. Yığın yoğunluğu 470-940 kg/m³ aralığındaki materyaller, 15 dakika boyunca 150-200 ve 250 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra peletlenmiştir. Elde edilen peletlerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenerek karşılaştırılmıştır. PMK’nin peletlenmesinde, kuru bir yapıda olmasından dolayı güçlük çekilmiş, PMDB ve PMS nin

materyal parçacık dağılımının düzgün olmamasından dolayı, elde edilen peletlerin çok kırılabilir olduğu görülmüştür. Çalışma sonucuna göre pelet üretiminin materyal parçacık boyutu ve materyal çeşidine bağlı olduğu vurgulanmıştır. Nem içeriği, kül içeriği, yoğunluk ve kalori değeri bakımından PMS peletlerinin 200-250 °C de peletlenmesi en iyi sonucu vermiştir (Munawar ve Subiyanto 2014).

Strandberg (2015), yaprak, ince dal ve kök içeren odun artıkları ile kaba odun artıklarının hammadde olarak kullanıldığı bir çalışmada, öğütülmüş ürünlere torefikasyon işlemi uygulanmış, torefiye edilen ürünlerin yanma karakteristikleri belirlenmiş ve gaz emisyonlarındaki değişim gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda her iki materyal için de torefikasyon sıcaklığının artması ile ısı değerlerinde artış gözlenmiştir. Magdziarz vd. (2017), karma ağaçlardan oluşan öğütülmüş orman ürünleri artıklarının artan sıcaklıklarda torefiye edilmesiyle, yanma sonucu ortaya çıkan emisyon gazlarında düşüş gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Ren vd. (2017), torefiye edilmiş biyokütle ürünlerinin yakılması sonucunda ortaya çıkan NO_x ve SO₂ emisyonlarının azaldığını bildirmişlerdir.

Yoshida vd. (2015)'nin gerçekleştirdiği çalışmada, sedir ve meşe ağaçları artıklarından elde edilen peletlere torefikasyon işlemi uygulanmıştır. Peletler 5 dakika boyunca belirlenen gaz sıcaklıklarına tabi tutularak fırın soğumaya bırakılmıştır. Çalışma sonunda sedir peletleri için 260 °C torefikasyon sıcaklığında üst ısı değeri 18 MJ/kg'dan 22.9 MJ/kg'a, meşe peletleri için 320 °C torefikasyon sıcaklığında üst ısı değeri 16.8 MJ/kg'dan 25.3 MJ/kg'a yükselmiştir.

Elmay vd. (2013), hurma ağacı budama artıklarından ürettikleri peletlerin yakılması sırasında yanma verimlerinin %80 düzeyinde olduklarını bildirmiştir. Araştırmacılar, hammaddenin yüksek klor ve kül içermesi nedeniyle 2400-3600 ppm düzeylerinde yüksek CO emisyonlarına neden olduğunu, bu nedenle yakma sırasında yakıt besleme ve hava üfleme parametrelerinin gözden geçirilmesi gerektiğini bildirmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Hammadde

Zeytin budama artıkları, Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Akademi Çiftlik arazilerindeki zeytinliklerde bulunan zeytin ağaçlarının budama dönemlerinde elde edilmiştir. Budama sonrasında toplanan artıklar bir tarım arabası ile bölüm atölyesine getirilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Zeytin budama artıklarının toplanması

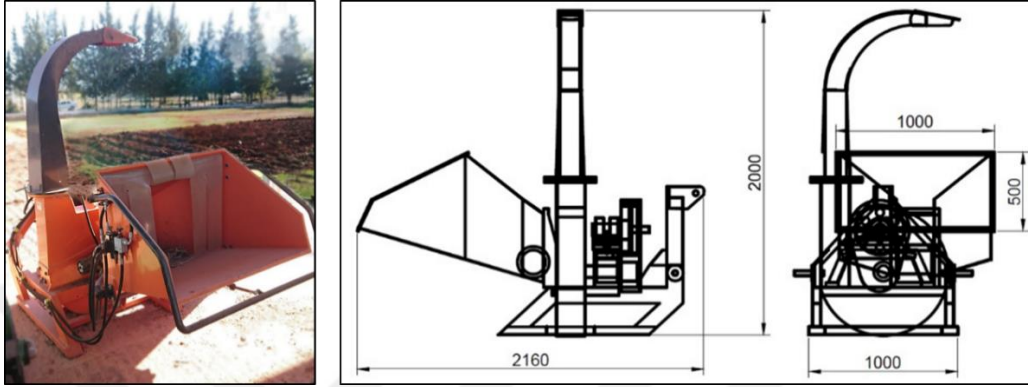
Domates sapları, Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Akademi Çiftlik seralarından ve Antalya ili, Gaziler Mahallesinde bulunan topraksız tarımla yetiştirilmiş domateslerin sapları toplanarak bölüm atölyesine getirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Sera domates bitki artıklarının toplanması

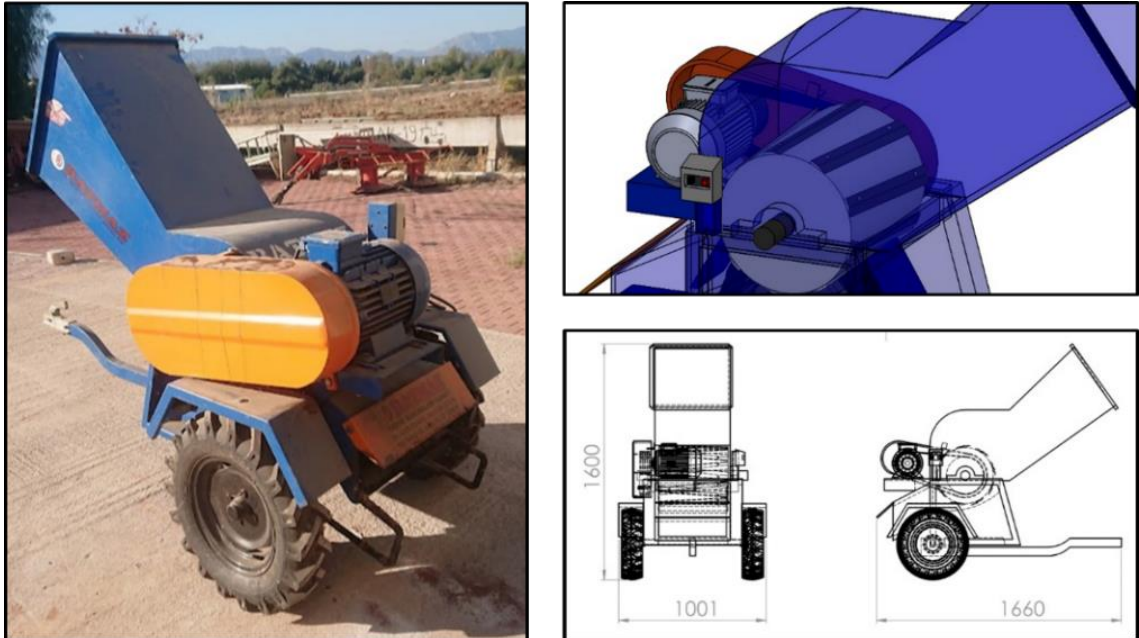
3.1.1. Hammaddenin peletleme işlemine hazırlanması

Zeytin budama artıkları ve sera domates bitkisi artıklarının peletlenmesi için hammaddenin öğütülmüş forma getirilmesi gerekmektedir. Bunun için, bölüm atölyesine getirilen artıklar önce parçalanarak boyutları küçültülmüştür. Zeytin budama artıklarının parçalanması işleminde, PTO tahrikli, hidrolik motorlu parçalama ünitesine sahip tamburlu tip bir dal parçalama makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Dal Sap Parçalama Makinesi

Sera domates bitkisi artıklarının parçalanması işleminde elektrik motor gücü 7.5 kW, tambur üstünde bıçak satışı 10+1, bıçakların belirli bir açı ile bağlandığı tambur devri 1500 devir/dakika olan bir yaş sap parçalama makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.4).



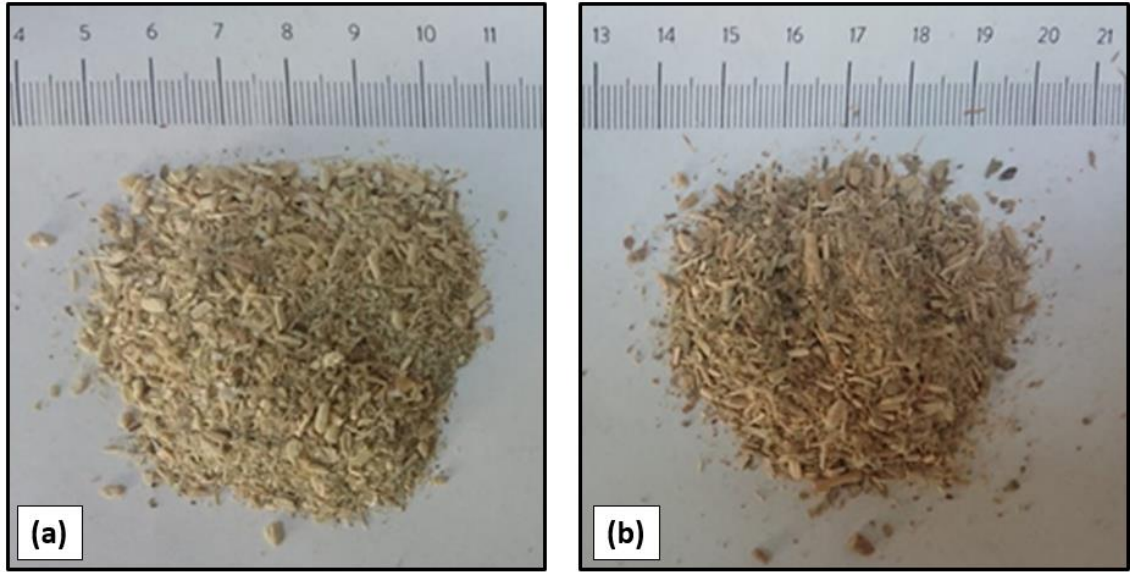
Şekil 3.4. Yaş Sap Parçalama Makinesi

Parçalanmış materyallerin öğütülmesini kolaylaştırmak için doğal kurutma yöntemi uygulanmıştır. Kurutma işleminde, beton zemine serilen parçalanmış materyaller fungal/bakteriyel aktivite oluşumunun engellenmesi için düzenli aralıklarla karıştırılarak havalandırılmıştır (Şekil 3.5). Haziran-Temmuz döneminde yapılan doğal kurutma işleminden sonra, budama sonrası %42, parçalama sonrası %11 olan parçalanmış zeytin budama artıklarının nem içeriği %8.15'e, seradan toplama işleminden sonra %76, parçalama sonrası %9 olan domates bitkisi artıklarının nem içeriği %6.15 düzeyine düşmüştür.



Şekil 3.5. Doğal kurutma işlemi sırasında parçalanmış **a)** domates sapı artıkları; **b)** zeytin budama artıkları

Kurutma işleminin ardından materyaller traktör kuyruk mili tahrikli bir çekiçli değirmen ile öğütülerek toz formuna getirilmiştir. Öğütme işleminde kullanılan çekiçli değirmen siklon sistemine sahiptir. Her iki materyalin öğütme işleminde traktör kuyruk mili devri 540 min^{-1} 'e sabitlenmiş olup değirmene materyal besleme işlemi sabit bir rejimde yapılmıştır. Öğütme işleminde 4 mm çapında elek kullanılmıştır. Öğütülmüş zeytin budama artıkları ve domates sapları Şekil 3.6'da yer almaktadır.

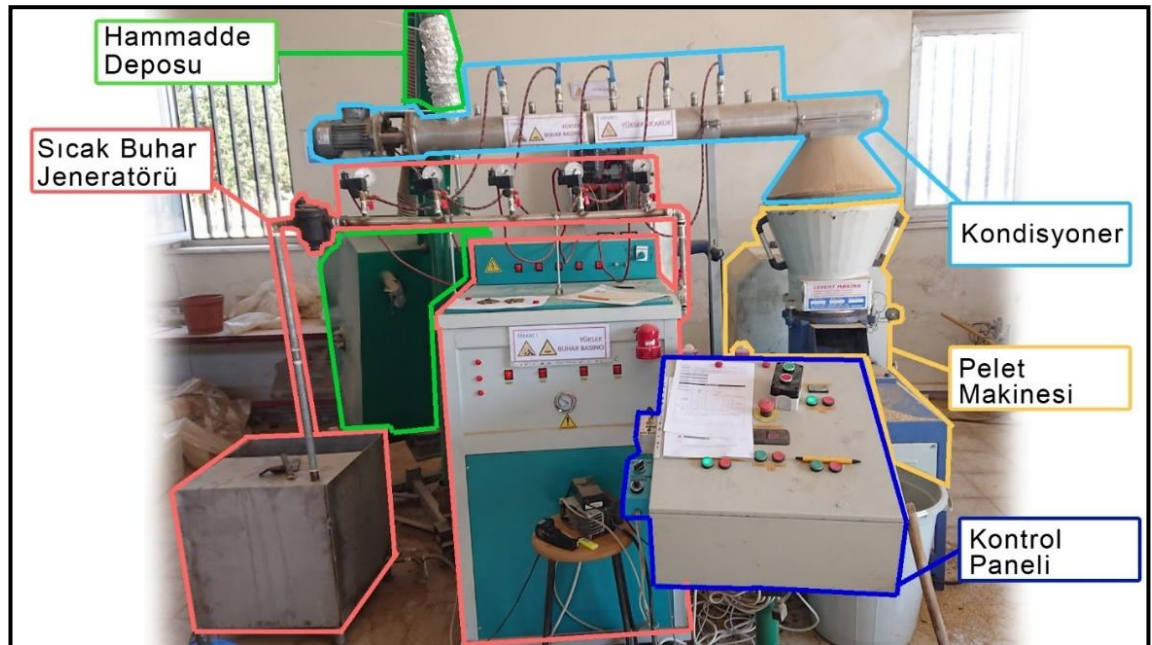


Şekil 3.6. 4 mm elek delik çapında öğütülmüş a) domates sapı artıkları; b) zeytin budama artıkları

Deneme planına göre hammaddelerin gruplaması yapılarak plastik torbalarda ağzı kapalı şekilde muhafaza edilmiştir.

3.2. Peletleme Sistemi

Peletleme sistemi; hammadde deposu, sıcak buhar ünitesi, peletleme makinesi ve kontrol panelinden oluşmaktadır (Şekil 3.7).

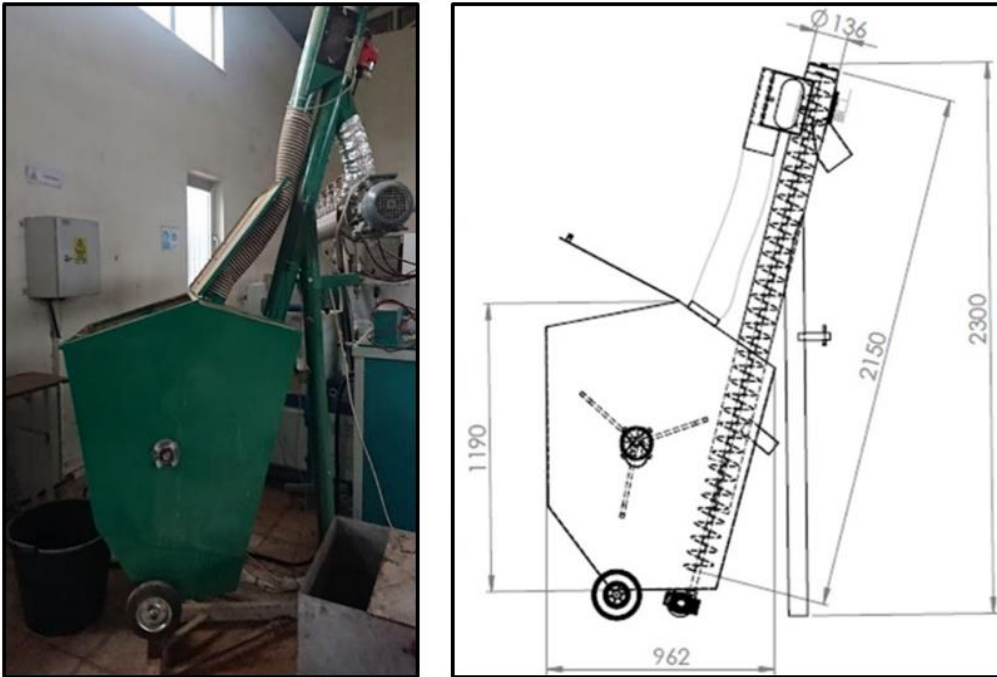


Şekil 3.7. Peletleme sistemi

Depodan alınan hammadde ilk etapta kondisyonere iletilmektedir. Kondisyonerde sıcak buhara maruz bırakılan hammadde karıştırılıp kesintisiz olarak peletleme makinesinin peletleme ünitesine aktarılır. Peletleme silindirleri ve pelet kalıbı arasında sürekli sıkışmaya maruz kalan hammadde, konik kalıp delikleri içerisinde sıkışarak pelet formu kazanır ve pelet çıkış bölgesinden peletler elde edilir.

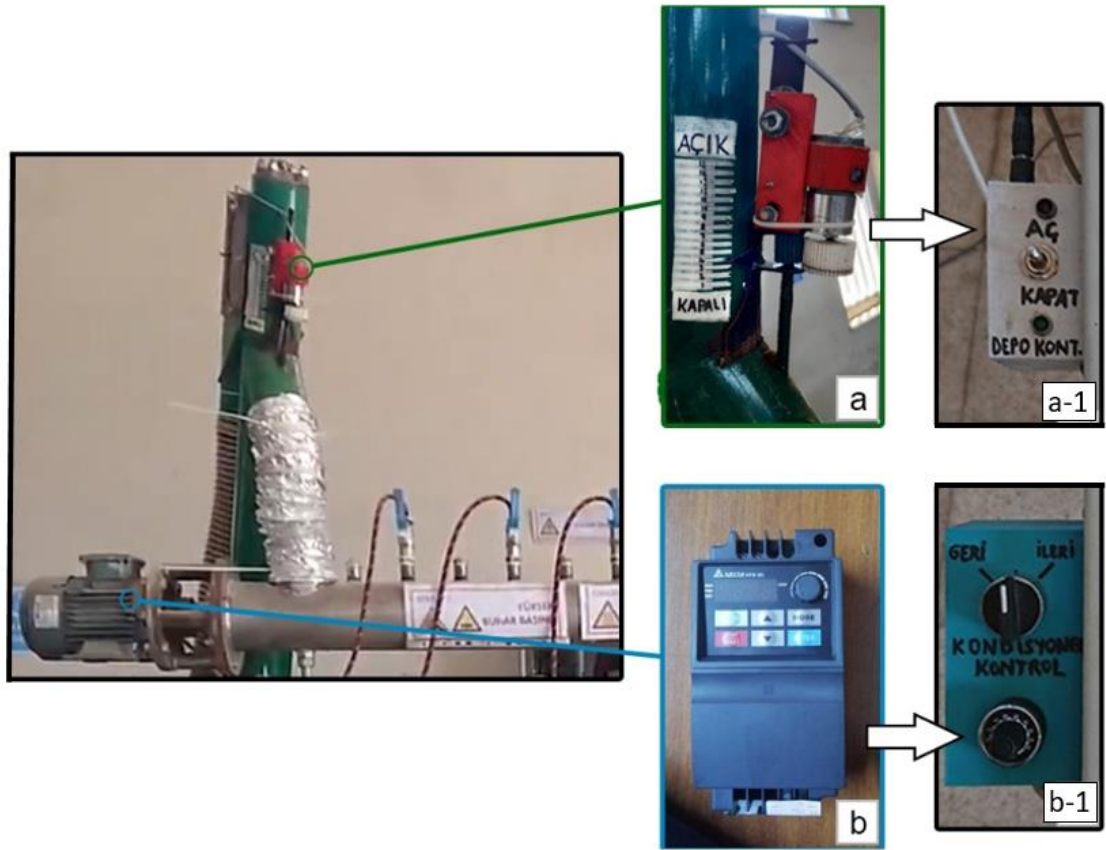
3.2.1. Hammadde deposu

Hammadde deposu, bölüm envanterinde bulunan otomatik beslemeli bir peletleme sisteminden çıkarılarak sıcak buharlı peletleme sistemine monte edilmiştir. Depoda hammaddenin homojen dağılım göstermesi için peletleme işlemi boyunca çalışan kanatlı bir karıştırıcı bulunmaktadır. Hammadde, depodan 136 mm çap ve 2150 mm yüksekliğinde bir helezonla zeminden 2 m yukarıya taşınmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Peletleme sistemine ait hammadde deposu

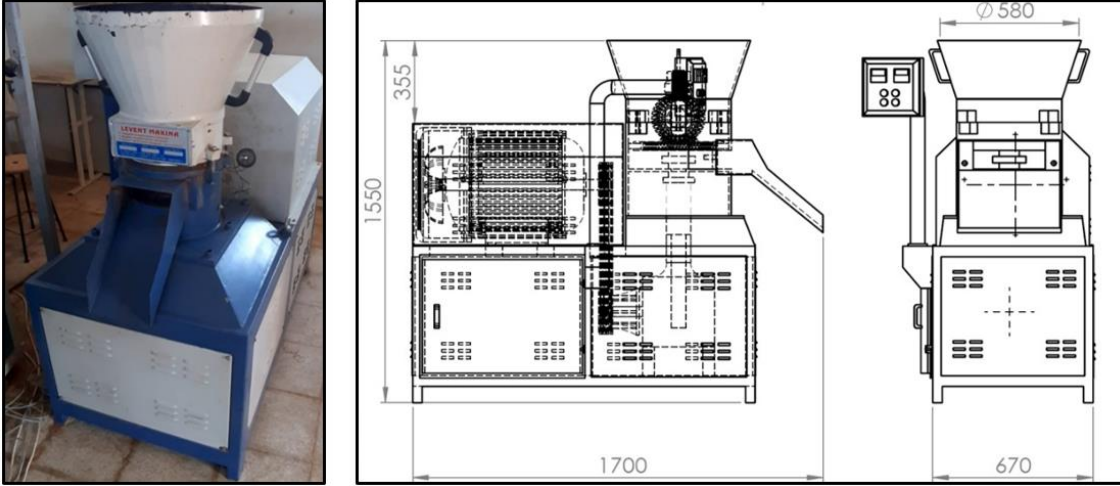
Hammaddenin depodan kondisyonere akış miktarını kontrol altında tutmak için elektrik motoru ve dişli sistemiyle kontrol edilebilen bir düzenek oluşturulmuştur. Hammadde, kapak açıklık boyutuna göre kondisyonere iletilmekte, fazla hammadde ise geri dönüş hattından tekrar depoya boşaltılmaktadır. Peletleme süresince hammadde iletim miktarını kontrol altında tutmak için hammadde deposundaki kapak açıklık miktarını ayarlayan depo kontrol kumandası ve kondisyoner motor devrini ayarlayan hız kontrol kumandası eş zamanlı kullanılabilir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Materyal akış kontrol ünitesinde yer alan **a)** depo açıklık ayarı motoru; **a-1)** depo açıklık ayarı kumandası, **b)** kondisyoner hız kontrol ünitesi, **b-1)** kondisyoner hız kontrol kumandası

3.2.2. Peletleme makinesi

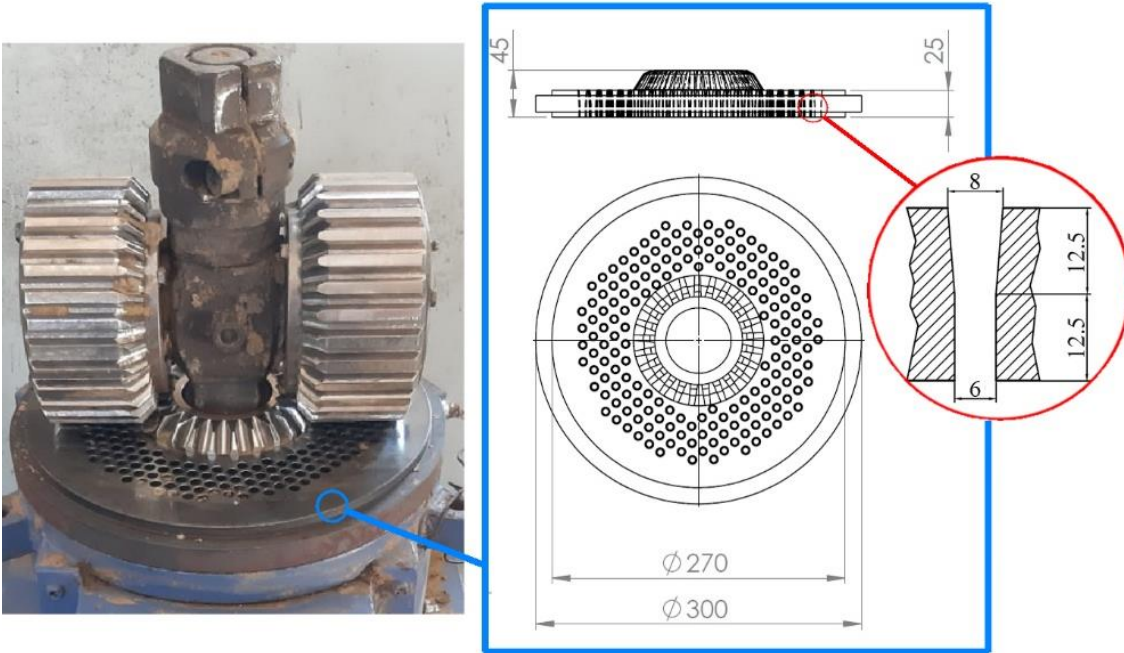
Peletleme işlemleri Levent Makine marka, orta ölçekli bir pelet makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Pelet makinesi, düz kalıplı, çift silindri, 15 kW gücünde elektrik motoruna sahiptir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Denemelerde kullanılan peletleme makinesi

Pelet makinesi üretim kapasitesi bakımından orta ölçekli olup, üretim kapasitesi, hammadde nem içeriği, kalıp geometrisi, hammadde çeşidi ve besleme yoğunluğuna bağlı olarak 50-120 kg/h aralığında değişebilmektedir.

Pelet kalıbı, evsel ısıtmada daha sık kullanılan 6 mm çapında peletler elde edilmek üzere tasarlanmıştır. Pelet kalıbı Levent Makine (Denizli, Türkiye) tarafından imal edilmiş olup hammaddesi AISI 4140 çelik alaşımıdır. Sertleştirme işlemi ile 56 HRC sertlik derecesine sahiptir (Şekil 3.11).

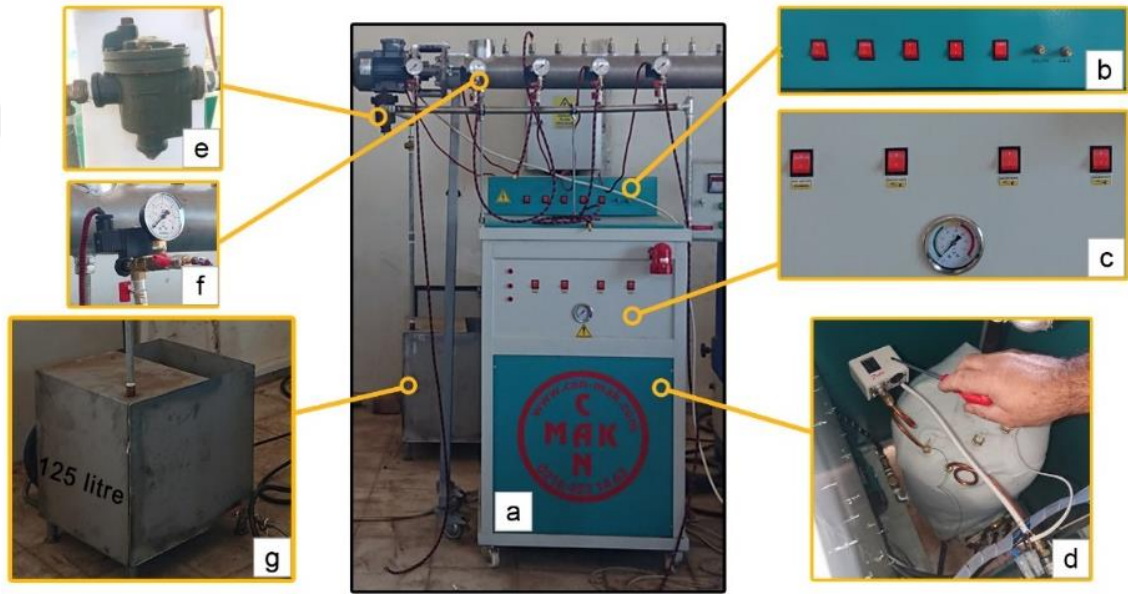


Şekil 3.11. Peletleme denemelerinde kullanılan pelet kalıbının teknik resim görünümü

3.2.3. Sıcak buhar ünitesi

Sıcak buhar ünitesi, hammadde deposundan peletlenmek üzere iletilen materyale sıcak buharın uygulanması için tasarlanmış ve imal edilmiştir. Sıcak buhar ünitesinde üretilen buhar, değişken basınç ve kademelerde kondisyoner üzerinde bulunan buhar giriş noktalarından materyale uygulanabilmektedir. Sıcak buhar ünitesi, sıcak buhar jeneratörü ve kondisyonerden oluşmaktadır (Şekil 3.7).

Sıcak buhar jeneratörü, 72 x 73 x 118 cm ölçülerinde, sac levhadan imal edilmiş kapalı bir ana gövde (a), buhar çıkış kontrol paneli (b), ısıtıcı kontrol paneli (c), buhar kazanı (d), kondenstop (e), buhar çıkış noktaları (f) ve su deposundan (g) oluşmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Sıcak buhar jeneratörü

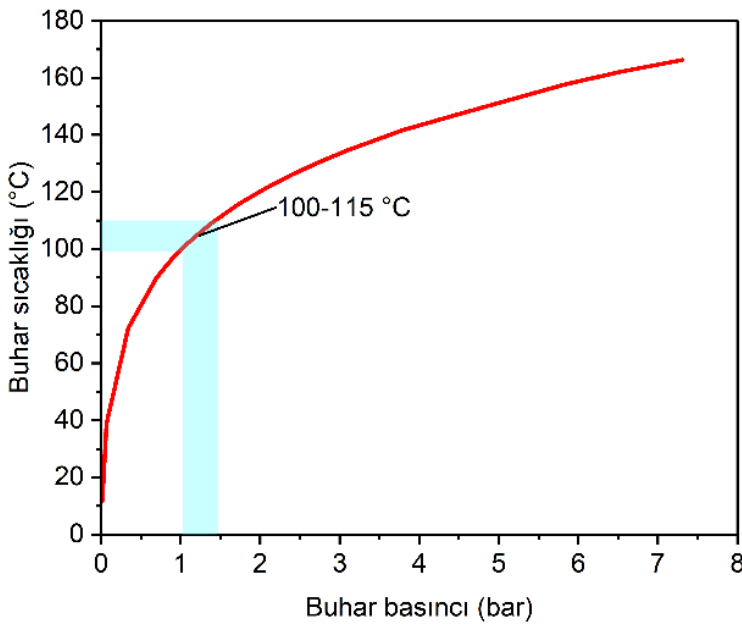
Sıcak buhar jeneratörü 30 litre kazana sahip olup her biri 7.5 kW gücünde 3 adet rezistanslı ısıtıcı ile buhar üretme işlemini yapmaktadır. Buhar üretim kapasitesi ve elde edilmek istenen buhar basıncına göre her bir rezistans ayrı ayrı kontrol edilmektedir. Buhar kaynağı olan su, 50x50x50 cm ölçülerindeki 125 litre kapasiteli su deposundan otomatik bir valf ile buhar kazanına çekilerek kesintisiz buhar üretimi sağlanabilmektedir.

Isıtıcı kontrol paneli üzerinde bulunan ana manometre (Şekil 3.12-c), buhar kazanındaki toplam buhar basıncını göstermektedir ve 4 bar basıncında buhar üretmek üzere sabitlenmiştir. Buhar basıncının 5 bar'a ulaşması durumunda buhar jeneratörüne entegre edilmiş devre ısıtıcıları kapatır ve sesli uyarı sistemi devreye girer. Aynı zamanda buhar kazanına doğrudan bağlı olan bir hat ucuna emniyet ventili yerleştirilmiştir. Bu sayede kontrol dışı basınç artışlarında ventil açılarak fazla buhar basıncı tahliye edilmektedir.

Sıcak buhar jeneratörü sürekli buhar üretimi sırasında toplam basıncın düşmesi durumunda su deposundan otomatik olarak su olarak toplam basıncı 4 bar'da sabitler. Buhar çıkış kontrol panelinde 5 ayrı buhar çıkış noktasında bulunan solenoid valfleri ayrı

ayrı açılıp kapatılabilmektedir. Açık konumdaki valfe bağlı manometre ilgili çıkış noktasındaki buhar basıncını ölçer. Buhar çıkış noktasındaki solenoid valf, basınç düzeyi ayarlanabilir özelliğindedir. Böylece her bir buhar çıkış noktası için basınç düzeyi ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Kondensatör ünitesi, buhar kazanından gelen buharın buhar çıkış noktalarına gitmeden önce yoğuşan miktarının toplanması ve kondisyonere giden buharın mümkün olduğunca kurutulması için sisteme entegre edilmiştir. Kondensatörde yoğuşan buhar, sıcak su olarak su deposuna geri dönmektedir.

Denemelerde, pelet üretim kapasitesi, hammadde iletim kapasitesi, kondisyoner ölçeği, peletleme sistemi ölçeği ve ön deneme sonuçları dikkate alınarak 3 buhar çıkışı kademeli olarak kullanılmıştır. Buhar basıncı ve sıcaklığı, sektördeki mevcut uygulamalar ve küçük/orta ölçekli peletleme sistemlerine entegre edilen sıcak buhar ünitelerinin buhar kapasitesi ve buhar uygulama koşulları incelenmiştir. Buhar basıncı, buhar basıncı/buhar sıcaklığı grafiğinde belirtilmiş olan 1.0-1.5 bar aralığında sabitlenmiştir (Keenan ve Keyes 1937) (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Buhar basıncı/buhar sıcaklığı grafiği

Şekil 14'de yer alan grafiğe göre, belirlenen buhar basıncı çalışma aralıklarında buhar sıcaklığı 100-115 °C'dir. Böylelikle, sıcak buharlı peletleme işleminde her bir buhar çıkış noktasından kondisyoner içine 100-115 °C sıcaklıkta buhar verilmektedir.

Çalışmada, buhar düzeylerinin belirlenmesinde literatürdeki deneyimlerden yararlanılarak buhar basıncı, buhar sıcaklığı, buhar düzeyi ve buhar kapasitesi değerleri dikkate alınmıştır. Denemelerde buhar basıncı, buhar sıcaklığı, buhar düzeyinin yanı sıra teorik buhar oranı tanımlaması yapılmıştır. Covelli (2016), Samuelsson vd. (2012) ve Larsson vd (2012) sıcak buharla peletleme işleminde hammaddeye 2-6 kg/h kapasiteyle buhar uygulaması gerçekleştirdiklerini bildirmiştir.

Sıcak buhar kapasitesinin hesaplanmasında, ilk etapta, buhar jeneratörü su deposu tam doldurularak buhar kazanının tam kapasitede buharla dolması sağlanmıştır.

Kondenstop ünitesinin su deposuna geri dönüş hattı yerinden sökülerek, yoğuşan buharın bir kaptan toplanması sağlanmıştır. Birinci buhar düzeyinde 1 saat boyunca 1-1.5 bar düzeyinde buhar salınımı gerçekleştirilmiştir. Bir saatin sonunda depodan eksilen su miktarı ve kondenstop ünitesinden su tartılarak teorik buhar kapasitesi kg/h olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.1).

Aynı prosedür ikinci ve üçüncü buhar düzeyleri için tekrarlanmıştır. Buhar uygulamasıyla ilgili Toplam su tüketimi (kg/h), Yoğuşan buhar miktarı (kg/h), Teorik buhar kapasitesi (kg/h) ve Teorik buhar oranı (%) değerlerinin hesaplanmasında sırasıyla eşitlik (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) kullanılmıştır.

$$TST \text{ (kg/h)} = \text{Dakikada tüketilen su miktarı (kg)} \times 60 \quad (3.1)$$

$$YB \text{ (kg/h)} = \text{Dakikada yoğuşan su miktarı (kg)} \times 60 \quad (3.2)$$

$$TBK \text{ (kg/h)} = TST \text{ (kg/h)} - YB \text{ (kg/h)} \quad (3.3)$$

$$TBO \text{ (\%)} = \frac{TBK \text{ (kg/h)}}{HBY \text{ (kg/h)}} \times 100 \quad (3.4)$$

Eşitliklerde, *TST*: Toplam su tüketimi (kg/h), *YB*: Yoğuşan buhar miktarı (kg/h), *TBK*: Teorik buhar kapasitesi (kg/h), *TBO*: Teorik buhar oranı (%), *HBY*: Hammadde besleme yoğunluğudur (kg/h).

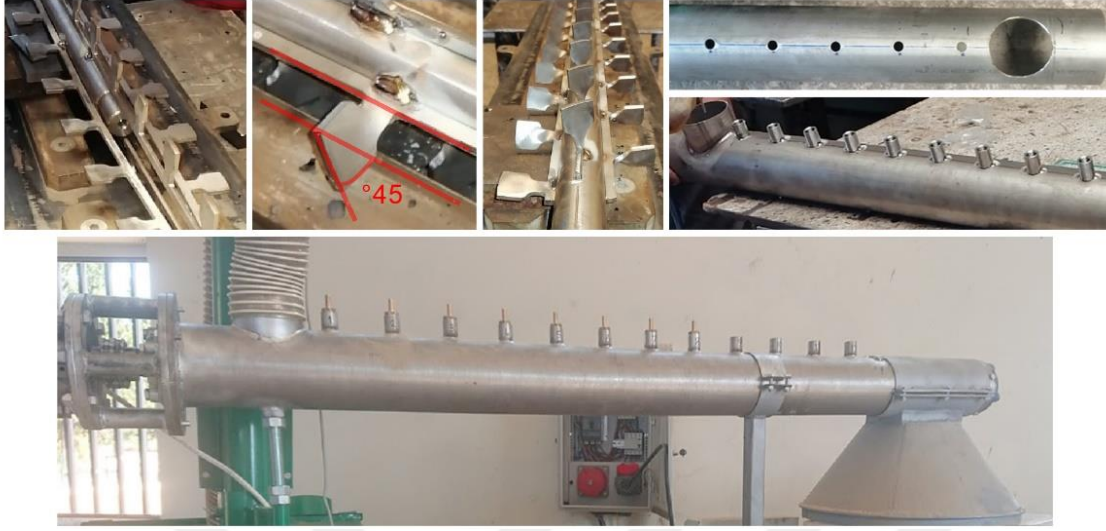
Çizelge 3.1. Değişken sıcak buhar düzeylerinde hesaplanan buhar parametreleri

| Buhar düzeyi kodu | Toplam su tüketimi (kg/h) | Yoğuşan buhar miktarı (kg/h) | Teorik buhar kapasitesi (kg/h) | Hammadde besleme yoğunluğu (kg/h) | Teorik buhar oranı (%) |
|-------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| B0 | 0 | 0 | 0 | 70-75 | 0 |
| B1 | 5.00 | 0.7 | 4.28 | 80-95 | 4-5 |
| B2 | 14.35 | 1.5 | 12.81 | 110-120 | 10-11 |
| B3 | 22.50 | 1 | 21.46 | 120-165 | 14-18 |

Sıcak buhar ünitesinin diğer bileşeni olan kondisyoner, hammadde deposundan gelen hammaddenin sıcak buharla ısıtılıp peletleme ünitesine iletim görevini gören, kanatlı helezona sahip bir götürücüdür. Sıcak buhar uygulanarak yüksek sıcaklığa sahip ve nemli hammaddenin kondisyoner iç duvarında ve bağlantı elemanlarına korozyona uğramaması ve dolayısıyla pas/tortunun hammadde içine karışmaması için tüm parçalar krom malzemeden imal edilmiştir.

Kondisyoner, 1700 mm boyunda, 130 mm çapında ve 4 mm et kalınlığında krom bir borudan imal edilmiştir. Boru içerisinde, boru merkeziyle çakışık, 1500 mm uzunluğunda ve dairesel iz düşüm çapı 110 mm olan kanatlı mil yerleştirilmiştir. Kanatlı mili oluşturan mil ve kanatlar, sıcak buhar ve nemin etkisiyle paslanmaması için krom malzemeden imal edilmiştir. Kanatlı mil üzerinde bulunan kanatlar, 45 derece açı ile

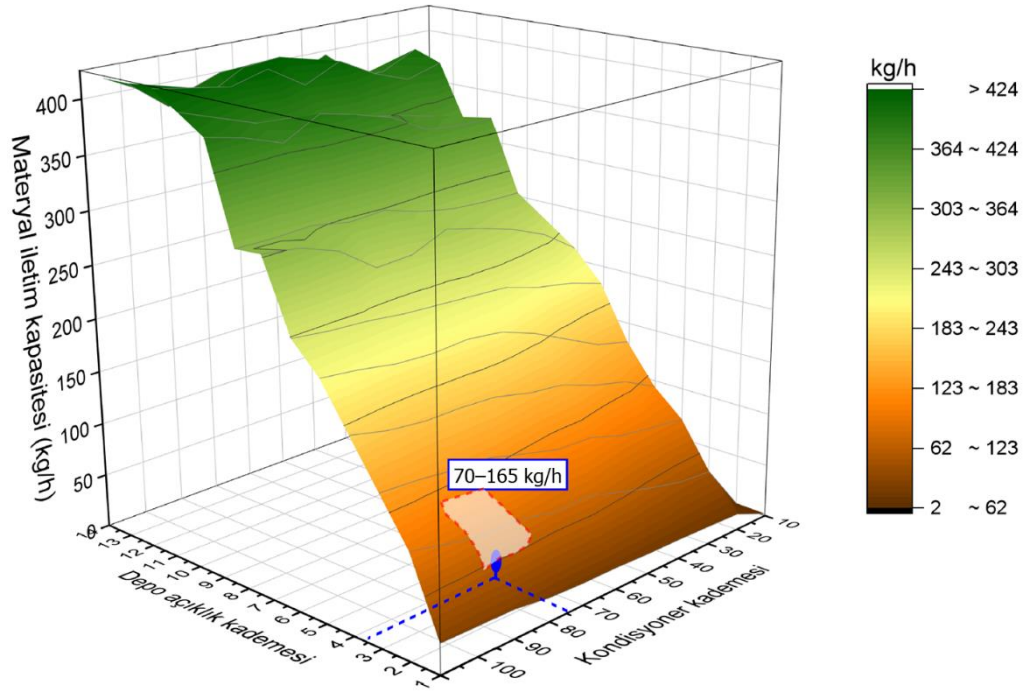
kıvrılarak mil boyunca helisel bir yapı oluşturacak şekilde mil üzerine yerleştirilen lamalara eşit aralıklı olarak kaynatılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Kondisyoner ünitesi

Kondisyoner başlangıç noktasına, kanatlı milinin dönü hareketinin sağlanması için 0.75 kW gücünde, maksimum devri 1400 min^{-1} olan 3 fazlı bir elektrik motoru zincir dişli kaplin ile bağlanmıştır. Kondisyonerin karıştırma etkinliği, materyal iletim miktarı ve buna bağlı olarak pelet üretim kapasitesinin kontrol altında tutulabilmesi için kondisyoner elektrik motorunun özelliklerine uygun bir hız kontrol ünitesi ve kontrol potları bağlanmıştır (Şekil 3.9-b1).

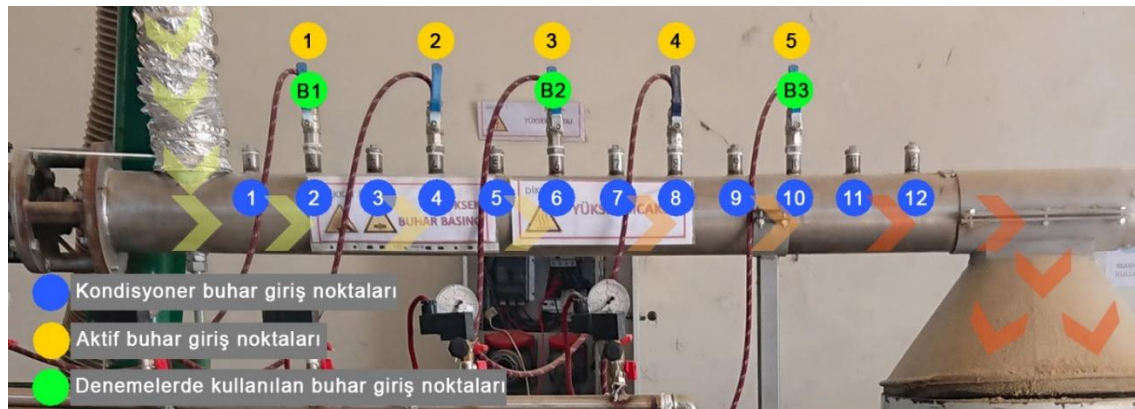
Kondisyoner, 4 mm elek delik çapında öğütülmüş çeşitli tarımsal artıkların karışımları kullanılarak kalibre edilmiştir. Kondisyonerin kalibrasyon eğrisi Şekil 3.15’de yer almaktadır.



Şekil 3.15. Kondisyoner kalibrasyon eğrisi

Peletleme işlemi sırasında hammadde çeşidi ve buhar kademesine göre stabil biçimde pelet elde edilmesi için depo açıklık miktarı 3-4 kademe aralığında, kondisyoner kontrol frekansı 70-80 Hz aralığında materyal akışı gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon grafiği dikkate alındığında materyal iletim değişkenleri aralıklarına göre materyal akış kapasitesi 70-165 kg/h aralığında değişmektedir.

Sıcak buharla peletleme işlemi 3 kademe gerçekleştirilmiştir. Kondisyoner üzerinde yer alan, 10 cm aralıklı, 10 adet buhar giriş noktalarından Giriş-2, Giriş-6 ve Giriş-10 seçilerek 40 cm aralıklı, I. Düzey (Giriş-2), II. Düzey (Giriş-2+Giriş-6) ve III. Düzey (Giriş-2+Giriş-6+Giriş-10) buhar uygulama noktaları belirlenmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Sıcak buharla peletleme sırasında aktif kullanılan buhar noktaları

Belirlenen sıcak buhar düzeylerinde peletleme öncesinde hammadde sıcaklığını ölçmek için kondisyonerin çıkışından hammadde örnekleri alınarak sıcaklık ölçere bağlı bir prob sıcak hammadde içine sokulmuştur. Yine her bir buhar kademesinde kondisyonerdan çıkan materyalden örnekler alınarak ilgili buhar kademesine karşılık gelen peletleme nemi ölçülmüştür.

3.3. Peletleme İşlemi

Öğütülmüş zeytin budama artıkları ve sera domates bitkisi artıkları mevcut peletleme sistemi kullanılarak üç farklı düzeyde sıcak buhar uygulaması ile peletlenmiştir. Sıcak buharla peletleme işlemi için oluşturulan deneme planı Çizelge 3.2’de yer almaktadır.

Her iki hammaddenin eşit koşullar altında peletleme ve sıcak buhar işlemine tabi tutulması için öğütülmüş hammaddeler güneş ışığı altında kurutularak nem içeriklerinin %8-9 (yb) aralığına gelmesi sağlanmıştır. Peletleme denemelerinin eşit koşullar ve ideal peletleme neminde gerçekleştirilebilmesi için öğütülmüş zeytin budama artıkları ve sera domates sapı artıkları kontrollü olarak nemlendirilmiştir. Nemlendirme işlemi sonunda hammaddelerin nem içerikleri sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları için sırasıyla %12.8 (yb) ve %12.9 (yb)’dur.

Peletlemeye hazır hammadde pelet makinesi hammadde deposuna doldurulmuştur. Bu sırada sıcak buhar jeneratörü kazanında hazır bulunan buhar, ilgili nozulun valfi açılarak kondisyonere iletilmiştir. Depo helezonunun çalıştırılmasıyla hammadde kondisyonere iletilerek peletleme işlemi başlatılmıştır.

Her bir peletleme işlemi için pelet üretim kapasitesi ve peletleme makinesi enerji tüketim değerleri kaydedilmiştir. Bunun için peletler üretilmeye başladıktan birkaç dakika sonra, makine rejime girip sabit pelet akışı sağlandığında üretim kapasitesi ve enerji tüketim değerleri dikkate alınmıştır.

3.3.1. Üretim kapasitesi

Pelet üretim kapasitesi, her bir peletleme işlemi için 60 saniye süresince bir kaptaki biriktirilen peletlerin tartılmasıyla kg/h olarak hesaplanmıştır. Uygulanacak torefikasyon koşulları, kontrol grubu ve yedek miktar için ihtiyaç duyulacak pelet miktarı hesaplandığında her bir faktör için yaklaşık 40 dakika boyunca pelet üretimi yapılmıştır. Bu süre dikkate alındığında her bir peletleme işleminin başında, ortasında ve sonunda 3’er kez olmak üzere 9 farklı üretim kapasitesi değeri alınıp ortalamaları hesaplanmıştır.

Sıcak buhar uygulamasının pelet üretim kapasitesine ve hammadde türüne göre farklılığının değerlendirilebilmesi için üretim kapasitesi değerleri orijinal bazda ve kuru bazda hesaplanmıştır.

3.3.2. Enerji tüketimi

Zeytin budama artıkları ve sera domates bitkisi artıklarının peletlenmesinde farklı düzeylerde sıcak buhar uygulamasının peletleme için gerekli olan elektrik enerjisi tüketimini hesaplamak için Chauvin Arnoux CA 8332B marka 3 fazlı portatif enerji analizörü kullanılmıştır. Enerji analizörü 380 V şehir elektrik şebekesi ile pelet makinesi motoru fazlarına bağlanmıştır.

Her bir peletleme faktörü için 1 saniye aralıklarla, peletleme işlemi süresince gerilim (V), akım (A), güç (W) değerleri kaydedilmiştir. Peletleme işlemlerinde makinenin rejime girip, kesintisiz ve homojen pelet akışının sağlandığı süre aralıkları kaydedilerek enerji tüketim kayıtlarında bu değerlere karşılık gelen bölgelerdeki veriler dikkate alınmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Enerji analizörü

Zeytin budama artıkları ve sera domates bitkisi artıklarının farklı kademelerde sıcak buharla ve buharsız peletlenmesi işlemlerinde özgül enerji tüketimi değeri aşağıdaki eşitlik (3.5) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{ÖET} = \frac{P}{\text{ÜK}} \times 1000 \quad (3.5)$$

Eşitlikte, ÖET: Özgül enerji tüketimi (kWh/ton), P: Ortalama güç (kW), ÜK: Pelet üretim kapasitesi (kg/h).

3.4. Torefikasyon Reaktörü

Çalışma kapsamında üretilen peletlerin torefikasyonu için bölüm envanterinde bulunan, 2018O2016 kodlu TÜBİTAK 1002 projesi kapsamında geliştirilen bir torefikasyon reaktörü kullanılmıştır. Reaktör, kabin tipi raflı bir reaktör olup 200-300 °C çalışma sıcaklığı aralığında azot ortamında çalışmaktadır.

Reaktör, kabin, raf sehpası, delikli raflar, fan ve ısıtma sistemi, baca ve kontrol panosundan oluşmaktadır (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Denemelerde kullanılan torefikasyon reaktörü

Kabin içinde 5 adet rafın yerleştirilebildiği bir raf sehpası, kabinin arka iç yüzeyine dikey konumda ve eşit aralıklarla konumlandırılmış 1 m boyunda, 4 adet, 1 kW gücünde serpantinli ısıtıcılar bulunmaktadır. Kabin üst yüzeyinde, kabin içi sıcaklığın mümkün olduğunca homojen yayılması için bir havalandırma pervanesi konumlandırılmıştır. Torefikasyon işleminde Oksijensiz ortam Azot (N_2) gazı ile sağlanmaktadır. Azot gazı 10 L/h debi ile bir gaz dağıtıcı aracılığıyla kabinin üst, sol ve sağ bölmelerinden ikişer girişle kabin içerisine aktarılmaktadır.

Raf sehpası, aralarında 5 cm mesafe bulunan rafların yerleştirilebilmesi için karşılıklı konumlandırılmış 10x2 adet raf ayağı bulunmaktadır. Rafların her biri 60x40 cm ölçülerindedir. Kabin içerisinde bulunan sıcak azot gazının tüm peletlere homojen düzeyde etki edebilmesi için her bir rafın tabanında 3 mm çapında raf tabanını

kaplayacak biçimde delikler bulunmaktadır. Torefikasyon gazları ve buharlaşan nemin sistemi terk etmesi için kabin alt yüzeyinde baca çıkış noktası bulunmaktadır.

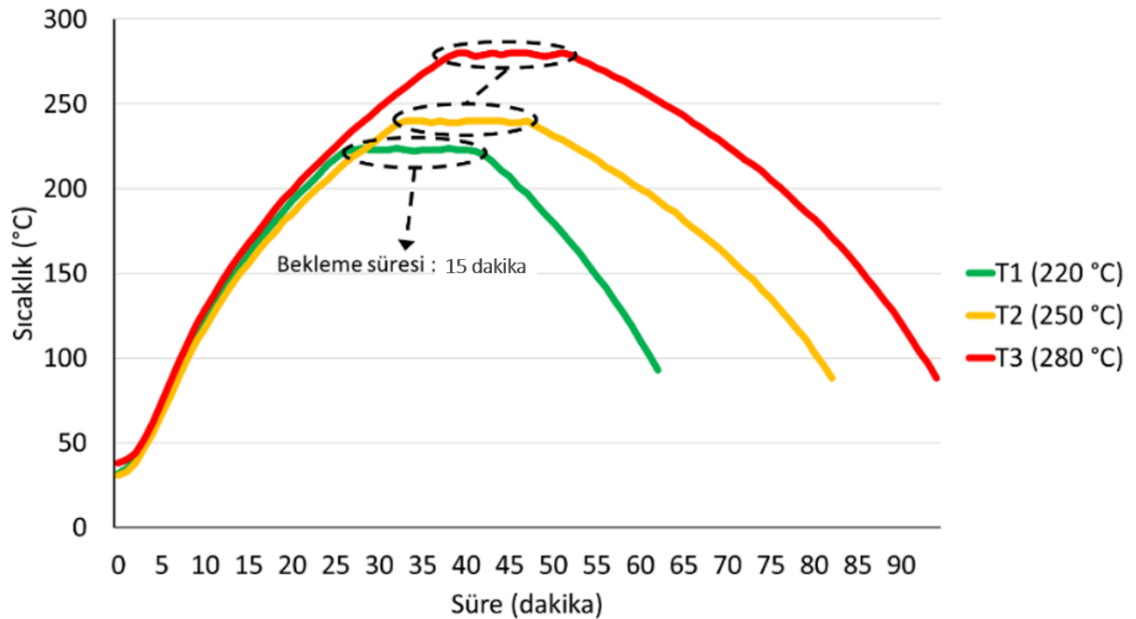
Kabin içi sıcaklık değerinin kontrol altında tutulabilmesi için ön denemelerle belirlenen noktalara 2 adet termokupl yerleştirilmiştir. Kontrol panelinde belirlenen sıcaklık değerine ulaşıldığında sistem ısıtıcıları kapatıp açarak kabin içi sıcaklığı sabitlemektedir.

3.4.1. Torefikasyon işlemi

Torefikasyon prosedürü, literatürdeki temel prensipler ve güncel çalışmalardaki gelişmeler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlara göre, torefikasyon işlemi temel değişkenlerinden sıcaklık ve bekleme süresinin reaktör geometrisi, reaktör hacmi, kapasite ve ısıtıcı tipi gibi birçok etmene göre değişebildiği bildirilmiştir.

Tarımsal artıklardan elde edilen çeşitli peletler ve çalışma kapsamında üretilen zeytin budama artığı ve sera domates bitkisi artıkları peletleri ile torefikasyon ön denemeleri ve reaktör kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Ön deneme ve kalibrasyon işlemi sonuçlarına göre belirlenen torefikasyon reaktörü sıcaklık profili Şekil 3.19'da yer almaktadır.



Şekil 3.19. Torefikasyon reaktörü sıcaklık profilleri

Deneme desenine göre, zeytin budama artığı ve sera domates bitkisi artıklarından üretilen peletler (T1) 220 °C, (T2) 250 °C, (T3) 280 °C (± 5) olmak üzere üç farklı sıcaklıkta 15 dakika bekleme süresinde torefikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Kontrol grubu peletleri T0 olarak kodlanmış olup, torefikasyon işlemine tabi tutulmamıştır.

Torefikasyon işleminde peletler reaktör raflarına yerleştirilerek reaktör kapağı kapatılmış ve ısıtıcılar çalıştırılarak azot akışı sağlanmıştır. Reaktör iç sıcaklığı, denemelerin gerçekleştirildiği Haziran-Temmuz aylarında oda sıcaklığından (35-40 °C) hedef sıcaklıklara 30-40 dakika süre aralıklarında erişmiştir. Peletler reaktör raflarındayken, reaktör içi hedef sıcaklığa ulaştığında 15 min bekletilmiş, ardından ısıtıcılar kapatılarak soğumaya bırakılmıştır. Soğuma sırasında reaktör iç sıcaklığı gözlem altında tutularak 70-80 °C düzeyine düştüğünde peletler reaktörden çıkarılarak plastik kaplara konulmuş, pelet sıcaklıkları ortam sıcaklığına (35-40 °C) geldiğinde kapakları kapatılmıştır.

Üç farklı düzeyde sıcak buharla üretilen zeytin budama artıkları ve sera domates bitkisi artıkları peletlerine üç farklı torefikasyon sıcaklığı uygulandığı deneme planı ve pelet kodları Çizelge 3.2'de yer almaktadır.

Çizelge 3.2. Deneme planı

| MATERYAL | Sıcak Buhar Düzeyi (Faktör 1) | Torefikasyon Sıcaklığı (Faktör 2) | Pelet kodu |
|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------|
| Sera Domates Bitkisi Artıkları (D) | 0 (B0) | 0 (T0) | D-B0-T0 |
| | | 1 (T1) | D-B0-T1 |
| | | 2 (T2) | D-B0-T2 |
| | | 3 (T3) | D-B0-T3 |
| | 1 (B1) | 0 (T0) | D-B1-T0 |
| | | 1 (T1) | D-B1-T1 |
| | | 2 (T2) | D-B1-T2 |
| | | 3 (T3) | D-B1-T3 |
| | 2 (B2) | 0 (T0) | D-B2-T0 |
| | | 1 (T1) | D-B2-T1 |
| | | 2 (T2) | D-B2-T2 |
| | | 3 (T3) | D-B2-T3 |
| 3 (B3) | 0 (T0) | D-B3-T0 | |
| | 1 (T1) | D-B3-T1 | |
| | 2 (T2) | D-B3-T2 | |
| | 3 (T3) | D-B3-T3 | |
| Zeytin Budama Artıkları (Z) | 0 (B0) | 0 (T0) | Z-B0-T0 |
| | | 1 (T1) | Z-B0-T1 |
| | | 2 (T2) | Z-B0-T2 |
| | | 3 (T3) | Z-B0-T3 |
| | 1 (B1) | 0 (T0) | Z-B1-T0 |
| | | 1 (T1) | Z-B1-T1 |
| | | 2 (T2) | Z-B1-T2 |
| | | 3 (T3) | Z-B1-T3 |
| | 2 (B2) | 0 (T0) | Z-B2-T0 |
| | | 1 (T1) | Z-B2-T1 |
| | | 2 (T2) | Z-B2-T2 |
| | | 3 (T3) | Z-B2-T3 |
| 3 (B3) | 0 (T0) | Z-B3-T0 | |
| | 1 (T1) | Z-B3-T1 | |
| | 2 (T2) | Z-B3-T2 | |
| | 3 (T3) | Z-B3-T3 | |

3.5. Hammadde Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışmada peletlenecek materyal olarak kullanılan zeytin budama artıkları ve sera domates bitkisi artıklarının toplama işleminde, parçalama işleminde, kurutma ve öğütme işleminde ve peletleme işlemi öncesi nem içerikleri ASAE S269.5 (2012) standardına göre hesaplanmıştır.

Artıkların parçalanmış ve öğütülmüş formları ile peletlerin yığın yoğunlukları (EN 15103 2009) standardında yer alan yöntemle göre 5 L kap içerisinde dolduran materyal miktarı dikkate alınarak kg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Çekiçli değirmenle 4 mm elek delik çapında öğütülen hammaddelerin parçacık boyut dağılımlarının belirlenmesinde 20 cm çapında, 5 cm derinliğinde ve 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 1.7, 2.36 ve 3.0 mm elek açıklığına sahip 7 elek ve elek sarsma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Elek analizi seti

Öğütülmüş materyallerin ortalama geometrik çap değerlerinin hesaplanmasında eşitlik (3.6)'dan yararlanılmıştır (ASAE S319.3, 2003).

$$d_{gw} = \log^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \log(d_i))}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (3.6)$$

Eşitlikte d_{gw} : Ortalama geometrik çap (mm); w_i : Elek üzerinde kalan materyal miktarı (g); d_i : Elek açıklığı (mm); n : Elek sayısı

Öğütülmüş zeytin budama artıkları ve domates sapı artıklarının ADL (asit deterjan solüsyonlarda çözünemeyen lignin), ADF (asit deterjan solüsyonlarda çözünemeyen fiber), NDF (nötral deterjan çözeltilerde çözünemeyen fiber) içerikleri van Soest vd. (1991)'in yönteminden modifiye edilmiş olan ANKOM analiz yöntemine göre belirlenmiştir. Hemiselüloz ve selüloz içeriklerinin belirlenmesinde Eşitlik (3.7) ve Eşitlik (3.8)'den yararlanılmıştır (Phanphanich 2010).

$$\text{Hemiselüloz (\%)} = \%NDF - \%ADF \quad (3.7)$$

$$\text{Selüloz (\%)} = \%ADF - \%ADL \quad (3.8)$$

3.6. Pelet Fiziksel Kalite Testleri

Peletlerin ve hammadde örneklerinin tartılmasında maksimum kapasitesi 2.1 kg olan ± 0.01 g hassasiyetli elektronik terazi ve pelet boyutlarının ölçülmesinde ± 0.02 ölçüm hassasiyetinde elektronik bir kumpas kullanılmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. Elektronik kumpas ve hassas terazi

Hammadde ve peletlerin nem içeriklerinin tespit edilmesinde Memmert marka, 120 litre iç hacme sahip kurutma fırını (ETÜV), kül içerikleri ve uçucu maddelerin belirlenmesinde Nüve Marka, MF 120 model kül fırını kullanılmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Kurutma fırını ve kül fırını

Peletlerin mekanik dayanıklılık indeksinin belirlenmesinde EN 15210-1 standardına göre (EN 15210-1 2009) imal edilmiş motor gücü 0.5 BG (0.37 kW), motor redüktör devri 50 devir/dakika, peletlerin yerleştirileceği kutu ölçüleri 300x300x125 mm ve kutu iç merkezine çapraz olarak yerleştirilen 50 mm eninde, 230 mm uzunluğunda bir levhaya (baffle) sahip dayanıklılık test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Pelet dayanıklılık test cihazı

Mekanik dayanıklılık testine tabi tutulacak peletlerden 500'er gram tartılarak test cihazının kutularına konulmuştur. Cihaz 10 dakika boyunca çalıştırılarak kutulardan çıkarılan peletler 3.15 mm çapındaki elekten geçirilmiştir. Elek altına geçen toz ve küçük pelet partikülleri kayıp olarak değerlendirilerek test öncesi ve test sonrası pelet kütle kaybı eşitlik (3.9) ile % olarak hesaplanmıştır.

$$MD_i = \frac{m_s}{m_0} \times 100 \quad (3.9)$$

Eşitlikte MD_i : Mekanik dayanıklılık indeksi (%), m_s : Test sonrası elenmiş pelet kütlesi (g), m_0 : Test öncesi elenmiş pelet kütlesi (g)

Peletlerin basınç direncinin (sertlik) belirlenmesinde 60 ton kapasiteli, üzerinde yük hücresi (load cell) bulunan, valf ayarları değiştirilerek uygulama yükü minimum 1000 kg ve piston ilerleme hızı 1 mm/s olan ve uygulanan yüklerin anında bilgisayara aktarılıp izlenebildiği hidrolik tip basınç direnci test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Basınç dayanımı test cihazı

Basınç direnci testinde, test öncesi boy ve çapları ölçülen 5 adet pelet plaka üzerine yerleştirilmiştir. Sabit hızla ilerleyen hidrolik piston ile pelet kırılana kadar yük uygulanmıştır. Elde edilen kırılma eğrisinde maksimum kuvvet (N) dikkate alınarak pelet basınç direnci eşitlik (3.10) yardımıyla MPa olarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_x = 2F/\pi dl \quad (3.10)$$

Eşitlikte; σ_x : Gerilme direnci (MPa), F : Maksimum kırılma kuvveti (N); d : Pelet çapı (mm), l : Pelet uzunluğudur (mm)

Peletlerin elementel analiz, kül içeriği, uçucu madde ve renk analizleri öğütülmüş peletler ile yapılmıştır. Peletlerin öğütülmesinde laboratuvar tipi bir daneli ürün öğütme makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Laboratuvar tipi daneli ürün öğütücü

Pelet üretimindeki değişken buhar düzeyi ve üretilen peletlere uygulanan torefikasyon düzeylerinin pelet renk parametrelerine etkisinin belirlenmesi için renk analizi yapılmıştır. Renk parametrelerinin analizinde PCE Instruments marka PCE-CSM 3 Model renk analiz cihazı ve PCE-CSM-PTB model tozlar için renk ölçüm aparatı kullanılmıştır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Renk analiz cihazı ve toz ölçüm aparatı

Renk ölçümleri için peletler 105 °C’de 24 saat bekletilerek kurutulmasının ardından, laboratuvar tip öğütücüyle 1 mm’den küçük partikül büyüklüğünde öğütülmüştür. Öğütülen örnekler toz ölçüm probuna yerleştirilerek üç tekerrürlü renk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Renk analiz cihazından elde edilen L (parlaklık), a (kırmızı-yeşil) ve b (sarı-mavi) değerleri kaydedilerek ortalamaları hesaplanmıştır. Kontrol gruplarıyla renk farklılıklarının belirlenmesinde Δa , Δb , ΔL ve ΔE değerleri eşitlik (3.11), (3.12), (3.13) ve (3.14) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\Delta a = a_1 - a_2 \quad (3.11)$$

$$\Delta b = b_1 - b_2 \quad (3.12)$$

$$\Delta L = L_1 - L_2 \quad (3.13)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta L^2} \quad (3.14)$$

Eşitliklerde, indis 1 (x_1): Kontrol grubu peletinin renk parametreleri, indis 2 (x_2) işlem görmüş peletin renk parametreleri, Δa : Kırmızı-yeşil ton farklılığı, Δb : Sarı-mavi ton farklılığı, ΔL : Parlaklık farklılığı, ΔE : Tüm renk parametrelerinin farklılığıdır.

Hammadde ve peletlerin görsel olarak incelenmesi ve detaylı görüntü elde edilmesinde TRONIC XJL-17AT Ters Trinoküler Metalurji Mikroskobu ve UCMOS03100KPA mikroskop kamerası kullanılmıştır. Görüntüleme işleminde hammadde partikülleri ve peletler mikroskop tablasına sabitlenmiş, her bir örnek için 10X, 2X, 40X ve 100X lens ile 50 kare fotoğraf katmanı kaydedilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. Ters trinoküler metalurji mikroskobu

Kaydedilen fotoğraflar CombineZP yazılımı kullanılarak Focus Stacking (Clark ve Brown 2015) yöntemiyle birleştirilmiş ve bütünleşik görüntü elde edilmiştir.

3.7. Ultimate (Elementel) ve Proximate (Kısa) Analizler

Hammadde çeşidi, sıcak buhar uygulaması ve torefikasyon işleminin pelet elementel içeriklerine etkisinin belirlenmesi için peletlere elementel (ultimate) analizler analizleri uygulanmıştır. Elementel analizler ThermoScientific Marka, Flash 2000 model elementel analiz cihazı ile Adıyaman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarından hizmet alım yoluyla yapılmıştır.

Kısa analizler (proximate) kapsamında, peletlerin nem içeriği, kül içeriği, uçucu madde miktarı ve sabit karbon oranı belirlenmiştir.

Peletlerin nem içeriklerinin belirlenmesinde ASAE S269.5 (2012) standardından yararlanılmıştır. Nem içeriği analizinde, ilgili pelet grubundan yaklaşık 100 g pelet 105 °C sıcaklıktaki etüv fırınında 24 saat bekletilmiştir. Test öncesi yaş ağırlık ve test sonrası kuru ağırlık değerlerine göre pelet nemi yaş bazda % olarak hesaplanmıştır.

Peletlerin kül içeriklerinin hesaplanmasında ASTM D1102-84 (2021) standardından yararlanılmıştır. Kül içeriği testinde, 1-3 g kütleyle sahip pelet örneği laboratuvar ölçekli bir öğütücüde toz formuna gelinceye kadar (<1 mm) öğütülmüştür. Öğütülen örnek 105 °C sıcaklığa sahip etüv fırınında 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Porselen krozelere konulan örnekler kuru ağırlıkları kaydedilip kroze sehпасıyla birlikte önceden 550 °C'ye ayarlanmış kül fırını içerisine konulmuştur. 5 saat bekleme süresinin ardından kül fırınından çıkarılan örnekler yaklaşık 20 dakika desikatör içerisinde soğutularak tekrar tartılmıştır. Test öncesi ve test sonrası ağırlık değişimine bağlı olarak kül içerikleri kuru bazda hesaplanmıştır.

Uçucu madde analizi, ASTM E872-82 (2019) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Kurutulmuş ve öğütülmüş toz formundaki pelet örnekleri porselen krozelere konulup 1-3 g aralığında tartılmıştır. Daha sonra, önceden 900 °C'ye ısıtılmış kül fırınına kroze sehпасıyla birlikte yerleştirilip 7 dakika bekleme süresinin ardından çıkarılarak desikatör içerisinde yaklaşık 40 dakika bekletilmiştir. Test öncesi ve test sonrası ağırlık kaybına bağlı olarak uçucu madde içerikleri kuru bazda hesaplanmıştır.

Nem içeriği, kül içeriği, uçucu madde miktarı ve sabit karbon içeriğinin hesaplanmasında eşitlik (3.15), (3.16), (3.17) ve (3.18)'den yararlanılmıştır.

$$Nİ = \left[\frac{(m_Y - m_K)}{(m_Y - m_B)} \times 100 \right] \quad (3.15)$$

Eşitlikte, Nİ: Nem içeriği (% y.b), m_Y: Kurutma kabı ve yaş örneğin kütlesi (g), m_K: Kurutma kabı ve kuru örneğin kütlesi (g), m_B: Boş kabın kütlesidir. (g)

$$Kİ = \left[\frac{(m_S - m_B)}{(m_0 - m_B)} \times 100 \right] \quad (3.16)$$

Eşitlikte, Kİ: Kül içeriği (%), m_S : Test sonrası kap ve örnek kütlesi (g), m_B : Boş kabın kütlesi (g), m_0 : Test öncesi kap ve örnek kütlesidir.

$$UM = \left[\frac{(m_0 - m_S)}{(m_0 - m_B)} \times 100 \right] \quad (3.17)$$

Eşitlikte, UM: Uçucu madde miktarı (%), m_0 : Test öncesi kap ve örnek kütlesi (g), m_S : Test sonrası kap ve örnek kütlesi (g), m_B : Boş kabın kütlesi (g)

$$SK = 100 - UM - Kİ \quad (3.18)$$

Peletlerin üst ısıl değerleri (HHV) torefiye edilmiş tarımsal artıklar temelinde oluşturulan Nhuchhen ve Afzal (2017)'in eşitliği (3.19) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$HHV = 32.7934 + 0.0053C^2 - 0.5321C - 2.8769H + 0.0608CH - 0.2401N \quad (3.19)$$

Peletlerin alt ısıl değerleri (LHV) Nska vd. (2020) ve Obidzinski vd. (2019)'ın çalışmalarında yer alan, tarımsal artıklar için optimize edilmiş olan eşitlik (3.20) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$LHV = [HHV - 24.34(Nİ + 8.94H)]/1000 \quad (3.20)$$

Eşitlikte HHV : Üst ısıl değer (MJ/kg), $Nİ$: Nem içeriği (%), H : Hidrojendir (%).

Peletlerin yığın formundaki enerji eşdeğerlerini ifade eden Net Enerji Yoğunluğu, Pegoretti Leite de Souza vd. (2021)'nin çalışmasında belirtilen eşitlik (3.21)'e göre hesaplanmıştır.

$$NEY = YY \times HHV \quad (3.21)$$

Eşitlikte, NEY : Net enerji yoğunluğu (GJ/m³), YY : Pelet yığın yoğunluğu (kg/m³), HHV : Üst ısıl değerdir (MJ/kg).

Isıl değer, biyokütlenin enerji içeriği hakkında tanımlayıcı bir birim olmasına karşın, pratik kullanımda nem içeriği ve kül içeriği biyokütlenin yakılması sırasında maksimum verimin sağlanmasını engelleyen faktörlendendir (Pegoretti Leite de Souza vd. 2021). Bu nedenle yığın formundaki peletlerin gerçek koşullar alıntaki yakıt değerlerinin hesaplanmasında Purohit ve Nautiyal (1987)'in çalışmasında belirtilen Yakıt Değeri İndeksi eşitliği (3.22) kullanılmıştır.

$$YDİ = (HHV \times YY)/(Nİ \times Kİ) \quad (3.22)$$

Eşitlikte, *YDİ*: Yakıt değeri indeksi, *HHV*: Üst ısıl değer (MJ/kg), *YY*: Pelet yığın yoğunluğu (kg/m³), *Nİ*: Pelet nem içeriği (%), *Kİ*: Pelet kül içeriğidir (%).

3.8. Torefikasyon Verimliliği Göstergeleri

Kademeli sıcak buhar işlemleriyle üretilen zeytin budama artıkları ve sera domates bitkisi artıkları peletleri 220, 250 ve 280 °C'de torefiye edildikten sonra, torefikasyon verimlilik göstergelerinin belirlenmesi için kütle kaybı (KK), kütle verimi (KV), enerji verimi (EV), iyileştirme faktörü (İF) parametreleri hesaplanmıştır.

Torefikasyon verimlilik göstergelerinin hesaplanmasında eşitlik (3.23), (3.24), (3.25) ve (3.26)'dan yararlanılmıştır (Chen vd. 2013; Lee ve Lee, 2014; Mamvura vd. 2018).♦

$$KK = ((m_r - m_t)/m_r) \times 100 \quad (3.23)$$

$$KV = (m_t/m_r) \times 100 \quad (3.24)$$

$$EV = KV \times HHV_t/HHV_r \quad (3.25)$$

$$İF = HHV_t/HHV_r \quad (3.26)$$

Eşitliklerde; *KK*: Kütle kaybı (%), *KV*: Kütle verimi (%), *EV*: Enerji verimi (-), *İF*: İyileştirme faktörü (-), *m_r*: İşlem görmemiş peletin kütlesi (g), *m_t*: Torefiye edilmiş peletin kütlesi (g), *HHV_t*: Torefiye edilmiş peletin üst ısıl değeri (MJ/kg), *HHV_r*: İşlem görmemiş peletin üst ısıl değeridir (MJ/kg)

3.9. Peletlerin Yakılması

Peletlerin yakılması Kozlusan marka, Air Smartpel-11 model, ev tipi, hava üflemleri, 3-11 kW gücünde pelet sobasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. Ev tipi hava üflemlü pelet sobası

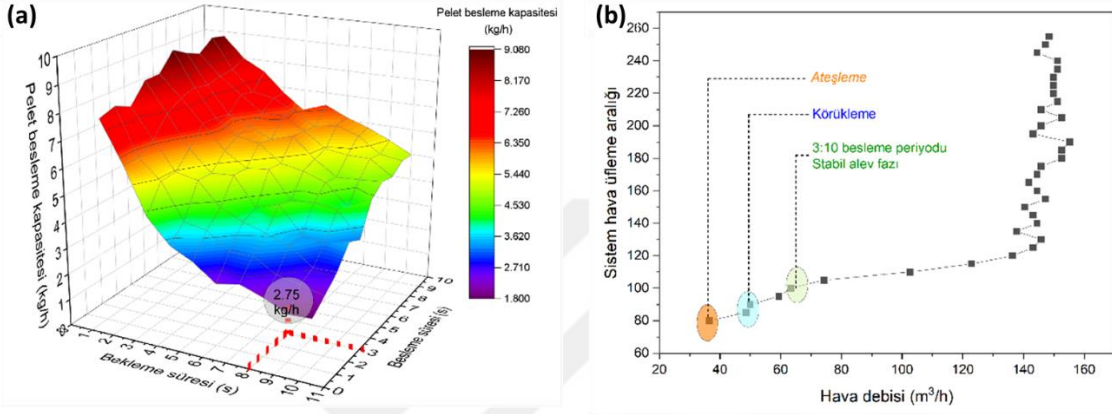
Peletlerin yakılması işleminde, yanma denemelerinin yapılacağı pelet çeşidi pelet deposuna doldurulmuştur. Pelet sobasında pelet yakma işlemi, ateşleme, körüklenme, alev yükseltme ve kararlı alev fazlarından oluşmaktadır (Yılmaz vd. 2020) (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. Pelet yakma fazları

Pelet yakma işlemi, sabit bir pelet besleme periyodu ve sabit hava üfleme hızında gerçekleştirilmiştir. Pelet sobasının arayüzünde belirlenen programa göre ilk etapta 20 s boyunca yanma odasına pelet beslemesi yapılmakta ve ateşleyici rezistans çalışmaktadır.

Bu sırada pelet sobası yanma odasında hava hızı 0.9 m/s, hava debisi 49 m³/h olarak ölçülmüştür. Peletler tutuşmaya başlayıp yanma odası sıcaklığı belirli bir düzeye ulaştığında kısa bir süre pelet beslemesi yapılarak körükleme fazına geçilir. Körükleme fazında hava hızının artışı sağlanarak alev sürekliliği sağlanır. Kararlı alev fazında, periyodik pelet besleme ve sabit hava üfleme hızı ile yanma sürekliliği sağlanmış olur. Karma peletler kullanılarak yapılan kalibrasyon işleminde, 3 saniye besleme, 10 saniye bekleme periyodunda pelet besleme kapasitesi yaklaşık 2.75 kg/h olarak hesaplanmıştır. Kararlı alev fazında yanma odasındaki hava üfleme hızı 1.18-1.90 m/s, bu değerlere karşılık gelen hava debisi 59-74 m³/h (1 atm, 25 °C) olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. Pelet sobasının a) yakıt besleme periyodu ve b) hava üfleme parametreleri

Yanma denemelerinde her bir pelet çeşidi ile yapılan pelet yakma işleminden sonra yanma odası, kül deposu, hava giriş kanalları ve soba bacası temizlenerek yakma prosedürleri sürdürülmüştür.

3.10. Bacagazı Emisyonlarının Ölçülmesi

Peletlerin pelet sobasında yakılması sırasında ortaya çıkan baca gazı emisyonları TESTO 340 marka baca gazı analizörü ile ölçülmüştür (Şekil 3.31).



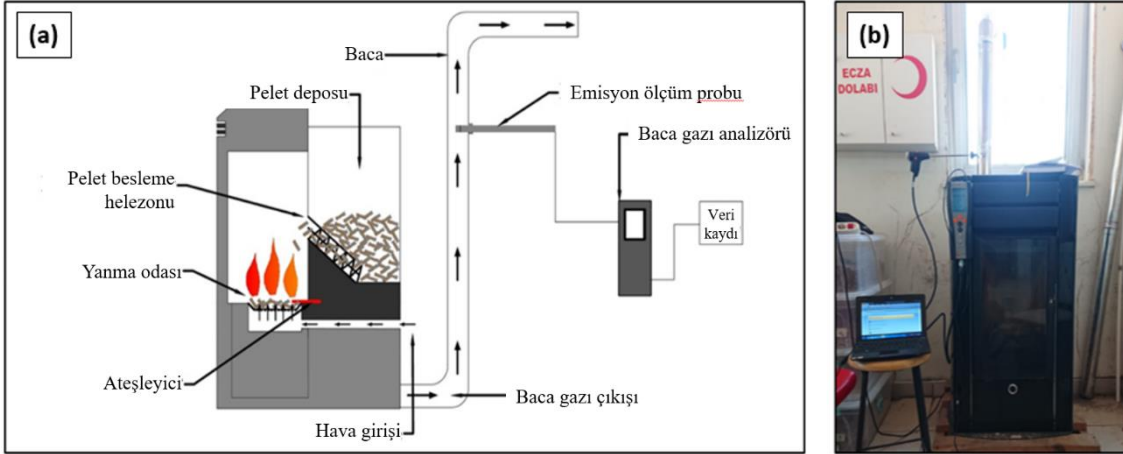
Şekil 3.31. Yanma denemelerinde kullanılan baca gazı analizörü

Baca gazı analizörü CO, NO, NO_x ve SO₂ hücrelerine sahiptir ve elektrokimyasal metod ile ölçüm gerçekleştirmektedir. Yanma denemeleri süresince baca gazı O₂ konsantrasyonu %13-15 düzeyindedir. Baca gazı analizörünün ölçüm aralıkları Çizelge 3.3'de yer almaktadır.

Çizelge 3.3. Baca gazı analizörünün ölçüm aralıkları

| Parametre | Ölçüm aralığı |
|---------------------|--------------------------------|
| CO | 0...10000 ppm ($\pm\%0.2$) |
| NO | 0...4000 ppm ($\pm\%10$ maks) |
| NO _x | 0...500 ppm ($\pm\%5$) |
| SO ₂ | 0...5000 ppm ($\pm\%10$ maks) |
| Baca gazı sıcaklığı | -40... +1200 °C ($\pm\%0.5$) |

Emisyon ölçümü sırasında ölçüm probu bacanın zeminden 120 cm yükseklik hizasına bir delik açılarak yerleştirilmiş ve etrafı alüminyum bant ile izole edilmiştir (Duong vd. 2022; Obaidullah vd. 2020; Formowitz 2010) (Şekil 3.32). Ölçümlere başlamadan önce peletlerin tutuşması ve sabit bir yanma rejimine ulaşması sağlanmıştır. Sabit yanma rejiminde ve kararlı alev fazında gerçekleştirilen emisyon ölçümleri 3 dakika süresince 1 saniye aralıklarla bilgisayara kaydedilmiştir. Her bir yanma denemesi sonunda pelet sobası yanma odası, kül haznesi, baca gazı çıkış kanalları ve baca gazı emisyon cihazının ölçüm probu temizlenerek denemeler sürdürülmüştür.



Şekil 3.32. Yanma denemelerinde kullanılan pelet sobası ve emisyon ölçüm sisteminin a) şematik görünümü b) baca gazı emisyon cihazının pelet sobasına kurulumu

3.11. Sonuçların Değerlendirilmesi ve İstatistiksel Analiz

Sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıklarının sıcak buhar yardımıyla peletlenmesi sırasında elde edilen pelet üretim parametreleri ve peletlere farklı sıcaklıklarda torefikasyon işlemi uygulanmasının ardından elde edilen pelet fiziksel özellikleri ve üretim parametrelerini değerlendirmek için SPSS 2018 programı kullanılmıştır.

Buhar düzeyi ve torefikasyon sıcaklığının bağımsız değişkenler (pelet üretim parametreleri ve pelet fiziksel özellikleri) üzerine etkisini istatistiksel olarak belirlemek için varyans analizi yapılmıştır ($P < 0.05$). Varyans analizi sonrası etkisi önemli olan faktörlerin çoklu karşılaştırılması için Duncan Çoklu Karşılaştırma testi uygulanmıştır.

Her iki hammaddede, her bir buhar düzeyi için torefikasyon sıcaklığının pelet fiziksel özelliklere etkisini belirlemek için Buhar Düzeyi x Torefikasyon Sıcaklığı interaksyonunun pelet fiziksel özellikler üzerine etkisi analiz edilmiştir.

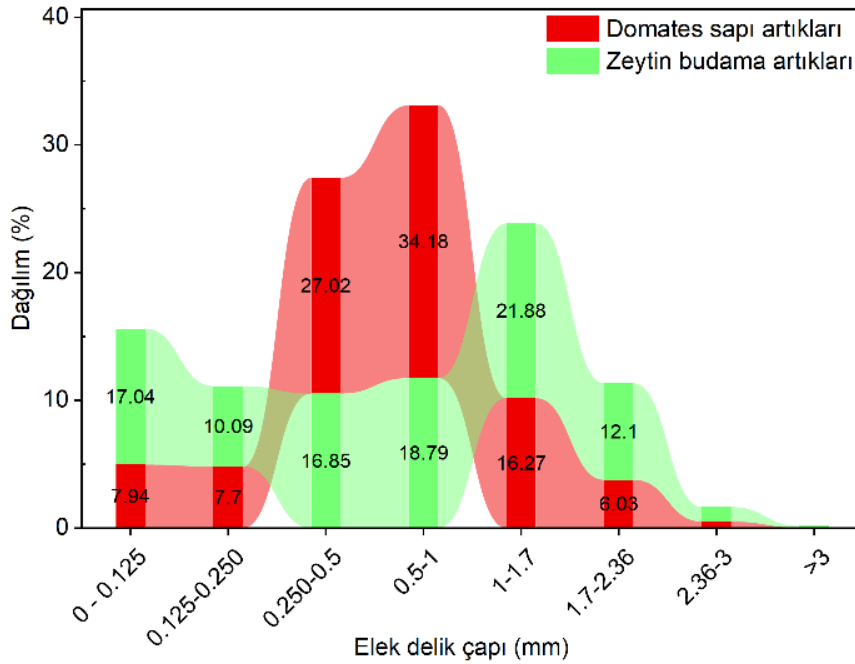
Peletlerin fiziksel özellikleri ve yakıt özellikleri, orman ürünleri dışındaki ısıl işlem görmüş peletler için belirlenen ISO/TS 17225-8 standardına göre değerlendirilmiştir (ISO/TS 17225-8, 2016).

Grafiklerin hazırlanması ve korelasyon analizinde süreli lisanslı Originlab Pro 2022b yazılımı kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Hammadde Özellikleri

Peletlenmek üzere 4 mm elek delik çapında öğütülmüş sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının parçacık boyut dağılımları Şekil 4.1'de yer almaktadır.



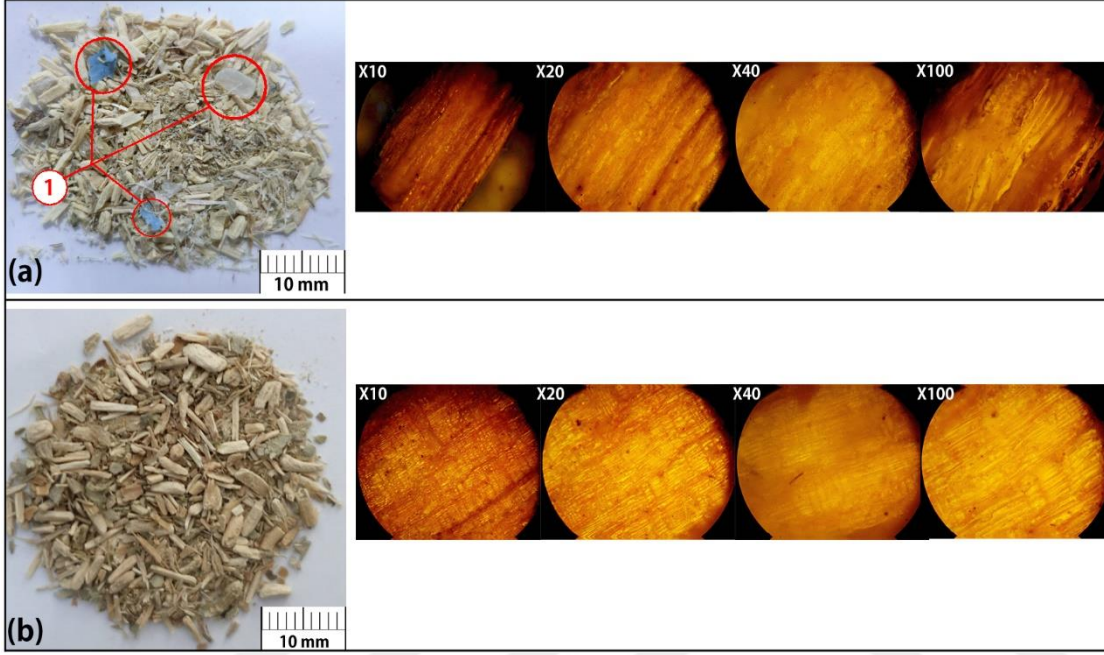
Şekil 4.1. Öğütülmüş sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının parçacık boyut dağılımları

Öğütülmüş sera domates bitkisi artıklarının ve zeytin budama artıklarının ortalama geometrik çap değeri sırasıyla 0.662 mm ve 0.743 mm, yığın yoğunluğu değerleri ise $271.52 \pm 2.49 \text{ kg/m}^3$ ve $433.8 \pm 5.41 \text{ kg/m}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Sera domates bitkisi artıklarında 1 mm'den büyük parçacık dağılım yüzdesi %23.16 iken, zeytin budama artıklarında bu değer %36.01'dir. Biyokütle kaynakları sınıflandırılırken biyokütlenin görece yumuşak veya sert yapısı dikkate alınarak kalitatif bir tanımlama yapılmaktadır. Brand vd. (2021) çam ağacı artıklarından oluşan odunsu yapıdaki biyokütlenin parçacık boyut dağılımında partiküllerin %100'nün 0.425 mm'den büyük olduğu, otsu yapıdaki çeltik sapının parçacık boyut dağılımında ise partiküllerin %21'nin 0.425 mm'den küçük olduğunu bildirmiştir.

Literatürde kabul gören bu sınıflandırmada daha çok ağaç benzeri biyokütle odunsu sınıfında yer alırken tarımsal ürün veya ot benzeri ürünler otsu sınıfına dahil edilmiştir (Tumuluru 2018). Holm vd. (2006) sert/yumuşak (hardwood/softwood)

sınıflandırmasının hammaddenin biyolojik kökenine atıfta bulunduğunu ve ürünün temel özellikleri hakkında hiçbir şey ifade etmediğini belirtmiştir. Bu sınıflandırmaya göre çalışmada peletlenmek üzere öğütülen sera domates bitkisi artıkları otsu yapıda, zeytin budama artıkları ise odunsu yapıda ürünlerdir. Öğütülmüş sera domates bitkisi artıklarının ve zeytin budama artıklarının genel görünüşleri ve partiküllerin mikroskop altındaki detaylı görünüşleri Şekil 4.2’de yer almaktadır.



Şekil 4.2. Öğütülmüş a) sera domates bitkisi artıkları b) zeytin budama artıklarının genel ve 3 mm’den büyük partiküllerin mikroskop altındaki görünüşleri

Domates bitkisi, serada yetiştiricilik sırasında bitkilerin askı sisteminde dikey pozisyonda durması için askı ipleri ve plastik klipslerle sabitlenmektedir. Artıkların toplanması sırasında her ne kadar ipler ve klipsler mümkün olduğunda temizlenmiş olsa da yığın formundaki bitki sapsarı içerisinde ip ve plastik klipslerin tamamıyla ayıklanması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle biyokütle ürünü olarak parçalanmış veya öğütülmüş formdaki domates sapsarının askı ipi ve plastik klips içermesi kaçınılmazdır (Şekil 4.2-a1). Fiziksel yapısı itibarıyla otsu özellikte olsa da parçalanmış plastik klipsler ve askı ipleri, otsu bir materyalden beklenen düzgünlükte bir parçacık boyut dağılımını engelleyebilecek niteliktedir. Ayrıca, plastik malzemenin hammaddenin fiziksel homojenizasyonunu etkilemesinin yanı sıra kül içeriğini ve peletlerin yakıt özelliklerini olumsuz yönde etkileyecektir.

Domates bitkisi artıklarının otsu yapıda olması, öğütme işlemi sırasında daha küçük partiküllere ayrılmasını kolaylaştırmıştır. Diğer yandan zeytin budama artıklarının odunsu ve sert yapısı iri ve sert partiküllerin hammadde içerisindeki oranının artmasına neden olmuştur. Şekil 4.2’de yer alan X100 lens altındaki mikroskop görüntülerinden de görüldüğü üzere, domates sapı partikülündeki boşluklu yapı daha belirginken, zeytin budama artığı partikülünün sıkışık ve yoğun yapıda olduğu görülmektedir.

Bu durum zeytin budama artıklarının yığın yoğunluğunun ve ortalama geometrik çap değerinin daha yüksek olmasının temel sebebidir.

Genel anlamda, peletlenecek hammaddenin öğütülmesindeki amaç, parçacık boyutunun düşürülerek materyaldeki toplam yüzey alanının artırılmasıyla partiküller arasındaki temas noktaları sayılarını arttırmak ve partiküller arası oluşacak bağı kuvvetlendirmektir (Mani vd. 2004; Ståhl vd. 2004).

Öğütme işleminde elek delik çapı, parçacık boyut dağılımı ve ortalama geometrik çap tanımlayıcı sayısal faktörler olmasına karşın, uygulamada elek delik çapına göre iri taneli (≥ 8 mm), orta düzey ($6 \text{ mm} \geq X \geq 4$ mm), toz formu (≤ 2 mm) olarak üç sınıfa ayrılabilir.

Yapılan çalışmalarda 4-6 mm elek delik çapında öğütülen otsu materyallerin yığın yoğunlukları, farklı çeşitteki buğday saplarında $90-123 \text{ kg/m}^3$ (Kashaninejad vd. 2014; Kirsten vd. 2016), arpa sapı, kanola sapı, yulaf sapı ve buğday sapı için sırasıyla 96 kg/m^3 , 144 kg/m^3 , 111 kg/m^3 , 107 kg/m^3 (Adapa vd. 2010), enginar sapı 114 kg/m^3 (Gil vd. 2012), kavun sapında 299 kg/m^3 (Yılmaz vd. 2021a), çim biçme artıklarında 281 kg/m^3 (Yılmaz vd. 2021c), mısır saplarında $100-300 \text{ kg/m}^3$ (Wongsiriamnuay ve Tippayawong, 2015) olarak hesaplanmıştır.

Literatürde yer alan 4-6 mm elek delik çapında öğütülmüş otsu yapıdaki biyokütle ürünlerinin yığın yoğunlukları $90-300 \text{ kg/m}^3$, ortalama geometrik çapları $0.517-1.076$ mm aralığındadır. Kaliyan ve Vance Morey (2009), biyokütlenin peletlenmesinde tercih edilen elek delik çaplarının genellikle $1.6-6.4$ mm arasında olduğunu, bu değerlerin ortalama geometrik çap değerlerinde $0.5-1.00$ mm'ye karşılık geldiğinin bildirmiştir.

Öğütülmüş biyokütlenin parçacık boyut dağılımı ve partikül büyüklüklerinin peletleme sırasında pelet üretimine ve pelet özelliklerine etkisi olduğu birçok çalışmada bildirilmiştir. Yapılan çalışmalarda üretim kapasitesi ve enerji tüketimi açısından ideal peletleme koşulları ve üst düzey pelet kalitesi için parçacık boyutunun etkisinin hammadde özellikleri (lignoselülozik yapı, otsu/odunsu yapı), öğütme işleminde kullanılan ekipman, hammaddenin öğütme sırasındaki nem içeriği, peletleme sisteminin özellikleri, sıcak buhar kullanımı gibi birçok etmene bağlı olduğunu göstermektedir. Bir biyokütle çeşidinde ideal olan elek açıklığı değeri başka bir biyokütle çeşidinde değirmen performansı ve enerji verimliliği açısından verimsiz olabilmektedir (Pradhan vd. 2018). Öğütme işleminde elek delik çapı küçüldükçe hammaddenin öğütülmek üzere değirmen içerisinde geçirdiği zaman ve buna bağlı olarak öğütme masrafları da artmaktadır (Bergström vd. 2008; Wilson 2010). Otsu yapıda tarımsal artıkların öğütülüp peletlendiği bir çalışmada hammadde partikül büyüklüğünün arpa, mısır koçanı ve dallı darının peletlenmesinde pelet yoğunluğuna etkisi bulunurken, buğday samanının partikül boyutunun pelet özellikleri üzerine bir etkisi bulunmamıştır (Mani vd. 2006)

Yapılan çalışmalarda 4-6 mm elek delik çapında öğütülen odunsu materyallerin yığın yoğunlukları, kayın ağacı ve çam ağacı 215.1 kg/m^3 ve 177.6 kg/m^3 (Masche vd. 2019), ceviz kabuğu 735 kg/m^3 (Lisowski vd. 2019), öğütülmüş çam yongaları 130 kg/m^3 (Rezaei vd. 2018), köknar 218 kg/m^3 (Liu vd.2016), ladin 172 kg/m^3 (Falk vd. 2015) olarak hesaplanmıştır.

Ghadernejad vd. (2012) ve Stelte vd. (2011)'ne göre öğütülmüş biyokütlenin iri taneli partiküllerden oluşması peletleme sırasında daha yüksek enerji gerektirmektedir ve peletleme işlemi zorlaşmaktadır. Diğer yandan, daha küçük partiküllerden oluşan hammaddenin peletlenmesinde, pelet kalıbı içerisinde yeterli sürtünme kuvvetinin oluşmamasından dolayı kalıp sıcaklığının doğal bağlayıcıların aktive olacağı düzeye ulaşmaması, sıkışma işleminin yetersiz kalmasına neden olarak pelet yoğunluğunu ve pelet fiziksel kalitesini düşürdüğü bildirilmiştir (Kirsten vd. 2016). Benzer şekilde, öğütülmüş hammadde içerisinde küçük partiküllerin fazla olması peletleme sırasında sürtünmeyi artırarak daha fazla sıcak buhar ihtiyacı doğurmaktadır (Kaliyan ve Vance Morey 2009; Pradhan vd. 2018). Böylelikle genel anlamda, parçacık boyutunun azalması sürtünmeye bağlı olarak pelet makinesi enerji tüketimini arttıracığı sonucuna varılmaktadır. İnce formda öğütülmüş ürünün peletlenmesi ile ilgili başka bir görüş de peletleme sırasında hammaddenin toz benzeri çok küçük partiküller içermesinin, bir süre sonra pelet kalıbına yapışmalarına neden olacağıdır. Bu durum Yılbaşı Ağacı Etkisi (Christmass tree effect) olarak adlandırılır (Kaliyan ve Vance Morey, 2009; Stelte vd. 2011b).

Parçacık boyutu, öğütülmüş biyokütlenin peletlenme karakteristiklerine etkisinin yanında hammaddenin depolanabilme özellikleri bakımından da önem arz etmektedir. Yüksek yığın yoğunluğu değerine sahip hammaddenin depolama işlemi daha verimli olurken düşük yığın yoğunluğu depolama sırasında daha fazla alan ve hacim gerektirmektedir. Mani vd. (2006) artan elek delik çapında öğütülmüş tarımsal artıkların yığın yoğunluklarının azaldığını bildirmiştir. Parçacık boyutunun hammadde yığın yoğunluğuna etkisi olduğu kadar pelet parça yoğunluğu ve pelet yığın yoğunluğu üzerine de etkisi bulunmaktadır. Harun ve Afzal (2016), düşük partikül boyutuna sahip tarımsal artıkların peletlenmesinde pelet yığın yoğunluğunun 584-799 kg/m³ aralığında hesaplandığını, hammaddeye %50 oranında iri partiküllü odunsu biyokütle karıştırıldığında pelet yığın yoğunluğu değerinin 627-969 kg/m³ değerine çıktığını bildirmiştir. Bu durum, odunsu biyokütlenin iri ve sert partiküllerin pelet kütlelerini, dolayısıyla yoğunluğunu arttırmamasından kaynaklanmaktadır. Sözü geçen çalışmada iri yapıda ve sert partiküller pelet içerisinde kütle artışı sağlamıştır. Diğer yandan 1 mm'den büyük odun partiküllerinin sıcak buhar uygulaması sonucunda buharın partiküller arası bağın oluşmamasına neden olduğunu (Labbe vd. 2020), bu durumun pelet içerisinde büyük partiküllerin bulunduğu noktalarda esnekliğin artarak kırılmaların bu noktalardan gerçekleşmesine neden olduğu bildirilmiştir (Thomas vd. 1998).

Zeytin budama artıkları genellikle kalın dal, ince dal ve yapraklardan oluşmaktadır. Bu nedenle öğütülmüş materyal, ince ve kalın dallardan kaynaklanan odunsu yapıya, uç sürgünler ve yapraklar da otsu yapıya sahiptir (Şekil 4.2).

Peletleme için kullanılacak biyokütlenin öğütülmesinde optimum elek açıklığı deliğinin belirlenmesi, hammaddenin peletlenebilirlik özelliklerinin yanında değirmen performansı ve enerji tüketimi ile de ilgilidir.

Labbe vd. (2020) hammadde parçacık boyutunun pelet dayanıklılığı üzerine etkisinin %20 düzeyinde olduğunu bildirmiştir. Grover ve Mishra (1996) pelet üretiminde öğütülmüş ürünün parçacık boyut dağılım düzgünlüğünün daha küçük partikül boyutundan daha önemli olduğunu bildirmiştir.

Bergström vd. (2008) hammadde parçacık boyutunun peletleme nemi, nem alma direnci ve termokimyasal dönüşüm işlemleri süresine etkisini olmadığını, öğütme işleminin 8 mm'den küçük eleklerde yapılmasına gerek olmadığını bildirmiştir. Bunun aksine Djatkov vd. (2018) mısır saplarının peletlenmesi için hazırlanan hammaddenin öğütülmesi sırasında elek delik çapının azalması pelet kalitesini arttırmıştır. Yazar, 8, 4 ve 2 mm elek delik çaplarında öğüttüğü mısır saplarından elde ettiği peletlerde pelet özelliklerinin tümüne etki ettiği sonucuna varmıştır.

Odunsu yapıya sahip budama artıklarının 4 mm elek delik çapında öğütüldüğü çalışmada zeytin budama, bağ budama ve nar budama artıklarının geometrik ortalama çapları sırasıyla 1.38, 1.23, 1.31 mm, yığın yoğunlukları sırasıyla 373, 310, 390 kg/m³ olarak hesaplanmıştır (Koçer ve Kürklü, 2020). Garcia-Maraver vd. (2015) zeytin budama artıklarını zeytin yaprakları (ZY), kalın zeytin dalları (ZK) ve yaprak, ince dal ve kalın dal karışımı bulunan budama artıkları (ZB) olarak üç farklı gruba ayırarak peletleme işlemi gerçekleştirmiştir. Peletleme işlemi öncesinde parçalama ve öğütme işlemlerinde ZY'nin çok ince partiküller içerirken, ZK'nın iri ve sert partiküllerden oluştuğunu, ZB'nin ise ince/toz formunda partiküllerin yanında oldukça fazla miktarda iri/sert partiküller içerdiğini bildirmiştir. Picchi vd. (2018), meyve bahçelerinden elde edilen budama artıklarının öğütülmesi sonucu, elma, bağ, şeftali budama artıklarına kıyasla, öğütülmüş zeytin budama artıklarının yüksek oranda (%11.6) iri daneli partikül içerdiğini bildirmiştir.

Bu çalışmada elde edilen yığın yoğunluğu değerinin Koçer ve Kürklü (2020)'nün çalışmasındaki yığın yoğunluğu değerinden yüksek olduğu, diğer bir deyişle aynı materyalin aynı ekipmanla öğütülmesi sonucunda daha küçük partikül boyutu ve ortalama geometrik çap değeri elde edildiği görülmektedir. Bunun temel sebebinin bu çalışmada, budama artıklarının daha düşük nem düzeyindeyken parçalanıp öğütülmesi olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü ham biyokütlenin kurutma düzeyi arttıkça öğütme ve parçalanma etkinliği artmaktadır. Gevrek yapıya sahip dal ve sap parçaları öğütme sırasında daha küçük partiküllere ayrılırlar.

Mani vd. (2006), artan elek delik çapında öğütülmüş tarımsal artıkların yığın yoğunluklarının azaldığını, peletleme için gerekli olan sıkışma kuvvetinin arttığını bildirmiştir. Diğer yandan, peletleme ve depolama etkinliği için mümkün olan en düşük elek çapı ile öğütme işlemi tavsiye edilirken elek delik çapının azalması, çekiçli değirmenlerde öğütme kapasitesinin düşmesine, enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda daha küçük partikül boyutunun peletleme işlemi zorlaştırdığı, pelet makinesinin sıkıştırma için gerekli olan basınç gereksinimini artırarak enerji tüketimini arttırdığı bildirilmiştir. Bu nedenle peletleme karakteristiklerinin belirlenmesinde hammaddenin odunsu veya otsu yapıda olması, parçalama ve öğütme sırasındaki nem içeriğinin önem arz ettiği sonucuna varılmıştır.

Samanın peletlenmesi amacıyla 2, 4 ve 6 mm delik çaplarında elek delik çapına sahip çekiçli değirmende öğütülmesi sonucu elek delik çapı arttıkça öğütme kapasitesinde düşüş, enerji tüketiminde artış gözlemlenmiştir. Öğütülmüş samanlarla yapılan peletleme işleminde 4 mm elek delik çapında öğütülen samandan elde edilen peletlerin fiziksel özelliklerinin 2 ve 6 mm'de öğütülen saman peletlerinden daha üstün özellikte olduğu sonucuna varılmıştır (Kirsten vd. 2016). Yazar bu durumu, 2 mm'de öğütülmüş ürünün çok küçük partiküllere sahip olması, sıkışma sırasında yeterli sürtünmenin

sağlanamayarak kalıp sıcaklığının doğal yapıştırıcıları aktive edecek düzeye gelmediği yönünde açıklamıştır.

Sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının lignin ve selüloz içerikleri Çizelge 4.1’de yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının lignoselülozik bileşenleri

| Hammadde | ADL (%) | ADF (%) | NDF (%) | Hemiselüloz (%) | Selüloz (%) |
|-------------------------|---------|---------|---------|-----------------|-------------|
| Domates sapı artıkları | 9.44 | 45.25 | 56.83 | 11.58 | 35.81 |
| Zeytin budama artıkları | 22.13 | 47.85 | 63.34 | 15.49 | 25.72 |

Sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının buharsız ve değişken düzeylerde sıcak buhar uygulamasıyla peletlenmesi sırasındaki peletleme nemi değerleri ve materyal sıcaklıkları Çizelge 4.2’de yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Değişken buhar düzeylerinde hammadde sıcaklıkları ve hammadde nem içerikleri

| Buhar düzeyi | Hammadde sıcaklığı (°C) | | Hammadde nemi (% , yb) | |
|--------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | Domates sapı artıkları | Zeytin budama artıkları | Domates sapı artıkları | Zeytin budama artıkları |
| B0 | 13.8 | 13.1 | 12.8 | 12.9 |
| B1 | 32.8 | 42.1 | 16.4 | 16.5 |
| B2 | 47.3 | 51.0 | 16.9 | 16.7 |
| B3 | 57.3 | 56.3 | 18.5 | 17.8 |

4.2. Üretim Kapasitesi ve Enerji Tüketimi

Pelet üretiminde özgül enerji tüketimi ve özgül enerji maliyeti pelet üretiminin etkinliğini belirleyen, pelet makinesinin uzun vadede elektriksel güç verimliliğini ve yatırım maliyetini etkileyen temel unsurdur (Jackson vd. 2016). Sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının üç farklı düzeyde sıcak buharlı peletleme işlemine ilişkin orijinal üretim parametreleri sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de yer almaktadır.

Çizelge 4.3. Artan buhar düzeyinde üretilen sera domates bitkisi artıkları peletlerinin peletleme işlemleri sırasında üretim kapasitesi ve enerji tüketimi değerleri

| Buhar Düzeyi | Üretim kapasitesi (kg, ob) | Üretim kapasitesi (kg, kb) | Enerji tüketimi (kW) | Özgül Enerji Tüketimi (kWh/ton, ob) | Özgül Enerji Tüketimi (kWh/ton, kb) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| B0 | 70.04a | 64.30a | 14.30a | 207.07c | 255.57c |
| B1 | 95.72b | 86.92b | 14.50a | 150.15b | 165.36b |
| B2 | 129.83c | 117.11c | 16.73b | 129.37a | 143.43a |
| B3 | 148.78d | 133.76d | 16.97b | 114.07a | 126.85a |
| Önemlilik* | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 |

*Aynı sütunda farklı harf ile gösterilen değerler p=0.05 düzeyinde istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Domates bitkisi artıklarının kademeli buhar düzeyiyle peletlenmesinde üretim kapasitesindeki artış istatistiksel olarak önemlidir. Buhar düzeyi, hammaddenin sıcaklığını ve nem içeriğini artırarak kalıp deliklerinde daha az sıkıştırma kuvveti gereksinimiyle pelet formu kazanmasını sağlamıştır. Peletleme denemeleri sırasında, eşit pelet üretimi yapmak ve peletleme makinesinin ortalama kapasitesini sabit tutmak adına güç tüketimi anlık olarak izlenmiştir. Hammadde besleme kapasitesi, güç, akım ve pelet çıkışı gözlemine göre anlık olarak belirlenmiştir. Buna göre, peletleme işlemi sırasında güç değerleri 14-17 kW, akım değerleri 30-32 Amper düzeylerinde sabit tutulmuştur. Bu koşullar altında, üretim kapasitesi değerleri B0 düzeyine göre B1, B2 ve B3’de sırasıyla %37.11, %85.96 ve %113.18 düzeyinde artmıştır. Özgül enerji tüketim değerleri B0 düzeyine göre B1, B2 ve B3’de sırasıyla %28.03, %38.11 ve %44.86 düzeyinde azalma meydana gelmiştir. Buna göre, sıcak buhar kademesinin artışı domates sapı peletlerinde üretim kapasitesini arttırmakta, özgül enerji tüketimi değerlerini düşürdüğü sonucuna varılmıştır. B2 ve B3 buhar düzeyindeki özgül enerji tüketimi değerleri arasında istatistiksel olarak bir farklılık bulunamamıştır. Buhar düzeyine göre özgül enerji tüketimi değerleri sayısal olarak artış gösterse de buharın peletleme işleminde sağladığı kolaylaştırıcı etki B3 düzeyinde azalmaya başlamıştır.

Çizelge 4.4. Artan buhar düzeyinde üretilen zeytin budama artıkları peletlerinin peletleme işlemleri sırasında üretim kapasitesi ve enerji tüketimi değerleri

| Buhar Düzeyi | Üretim kapasitesi (kg, ob) | Üretim kapasitesi (kg, kb) | Enerji tüketimi (kW) | Özgül Enerji Tüketimi (kWh/ton, ob) | Özgül Enerji Tüketimi (kWh/ton, kb) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| B0 | 73.01a | 68.56a | 16.50a | 228.01a | 242.82a |
| B1 | 101.30b | 94.92b | 17.47b | 172.58b | 184.19b |
| B2 | 105.98b | 95.06b | 16.50a | 152.80b | 166.99b |
| B3 | 108.00b | 98.82b | 16.53a | 156.04b | 173.95b |
| Önemlilik* | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 |

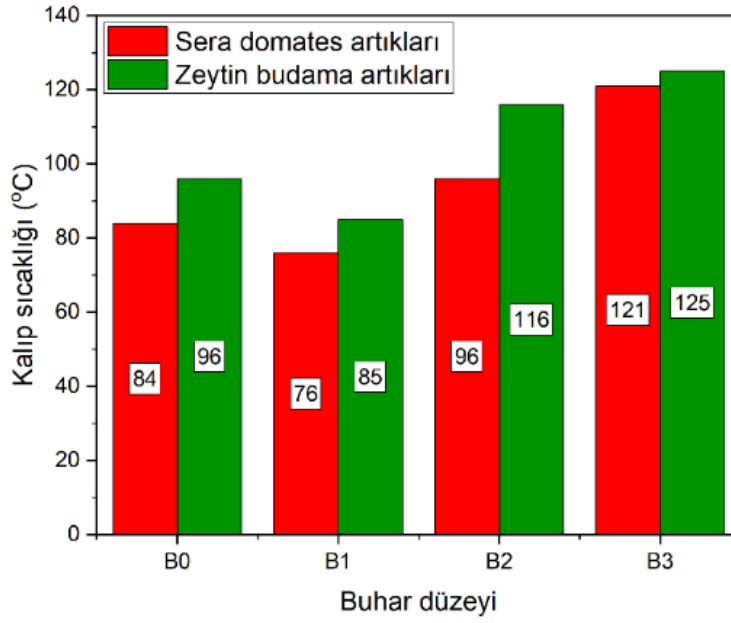
*Aynı sütunda farklı harf ile gösterilen değerler p=0.05 düzeyinde istatistiksel olarak birbirinden farklıdır.

Zeytin budama artıklarının peletlenmesinde, buhar düzeyinin etkisi B0 ve B1 düzeylerinde istatistiksel olarak önemliyken, B1, B2 ve B3 düzeyleri aynı grupta yer almaktadır. B0 buhar düzeyine göre B1, B2 ve B3 düzeylerinde üretim kapasitesindeki artış sırasıyla %27.89, %30.74 ve %27.89 olarak hesaplanmıştır. Artan buhar

düzeylerinde peletlenmesinde üretim kapasitesi B2 buhar düzeyine kadar artış göstermiş olup B3 buhar düzeyinde B2'ye göre düşüş meydana gelmiştir. Zeytin budama artıklarının odunsu, iri ve sert partiküllere sahip olması yüksek buhar düzeyinde nem içeriğinin ve sıcaklığın homojen olarak materyale ihtiva etmesine engel oluşturmuştur. (Tumuluru vd. 2011), ince formda öğütülmüş hammaddenin yüzey alanının fazla olması nedeniyle sıcak buharla peletleme işleminin daha etkin olduğunu bildirmiştir. Zeytin budama artıklarının fiziksel yapısı nedeniyle, sıcak buhar hammadde içerisine nüfuz edememiş, su tanecikleri partiküller üzerinde tutunmuştur. Bu durum B3 buhar düzeyindeki yoğun hammadde beslemesi sırasında peletleme ünitesi girişinde hammaddenin giriş duvarlarına yapışmasına, bir süre sonra yığın halinde peletleme ünitesine dökülmesine neden olmuştur. Bu nedenle B3 buhar düzeyindeki peletleme işleminde üretim zaman zaman kesintiye uğramıştır. Kaliyan ve Vance Morey (2009) hammadde tarafından emilemeyen nemin partiküller üzerinde kalarak yağ benzeri davranış gösterdiğini (lubrication effect), bu nedenle verimli bir peletleme işlemi sağlanmadığını bildirmiştir.

Buharsız peletleme sırasında zeytin budama artıkları ve sera domates sapı artıklarının üretim kapasitesi birbirine yakındır. Öğütülmüş zeytin budama artıkları, domates bitkisi artıklarına göre daha iri ve sert partiküller içermektedir. Bu nedenle zeytin budama artıklarının peletlenmesi sırasında hammaddenin sıkışma işleminin tamamlanarak pelet formu kazanmasında gecikme yaşanmıştır.

Peletleme işleminin ve buhar uygulamasının verimliliği hammadde çeşidi, nem içeriği ve hammadde parçacık boyutunun yanı sıra pelet kalıbı sıcaklığına da bağlıdır. Hammaddenin pelet kalıbı ve silindirler arasında oluşturduğu sürtünme kuvveti pelet oluşumu sırasında kalıp iç duvarlarında sıcaklığın artmasına sebep olur (Karkania vd. 2012). Peletleme sırasında kalıp sıcaklığının artması sürtünmenin arttığının göstergesidir ve hammaddenin pelet formu kazanması için gereken gücün ve özgül enerji tüketiminin artmasına sebep olur (Reed vd. 1980; Wang vd. 2020). Pelet kalıbındaki sürtünme hammadde besleme yoğunluğundan kaynaklanabildiği gibi hammaddenin fiziksel özellikleri de sürtünmenin artış sebebi olabilmektedir. Tumuluru (2018), sert ve iri partiküllü (odunsu) hammaddelerin sıkışma sırasında pelet kalıbında yüksek sürtünme kuvveti oluşturdukları bildirilmiştir. Denemeler sırasında ölçülen kalıp sıcaklıkları Şekil 4.3'de yer almaktadır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla benzerlik göstermekte olup pelet kalıp sıcaklığı değerleri sert ve iri taneli zeytin budama artıklarının peletlenmesinde domates bitkisi artıklarının peletlenmesi sırasında kaydedilen değerlerden yüksek olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. Peletleme sırasında ölçülen kalıp sıcaklıkları

Şekil 4.3’de görüldüğü üzere, buharsız pelet üretimine göre B1 düzeyindeki peletleme işleminde kalıp sıcaklıklarında düşüş gözlemlenmiştir. Bunun nedeni hammaddenin sıcaklığının ve nem içeriğinin artışıyla yumuşayarak kolayca kalıp deliklerinde pelet formu kazanmasıdır. Kolay sıkışma karakteristiği gösteren hammadde, daha az sürtünme kuvvetine maruz kaldığı için kalıp sıcaklıkları buharsız peletlemeye göre daha düşüktür.

Kalıp sıcaklıkları B1 düzeyinde düşüş gösterirken B2 ve B3 düzeylerinde artış göstermektedir. Teorik olarak değerlendirildiğinde, artan buhar düzeyinin kalıp sıcaklıklarını düşürmesi beklenir. Fakat buhar düzeyinin artışıyla makinenin pelet üretebilme kapasitesi arttığı için hammadde besleme yoğunluğu artırılmıştır. Peletleme sırasında sıcak buhar uygulaması, hammaddenin kalıp deliklerinden geçişini kolaylaştırdığı için peletleme kapasitesi artmıştır. Başka bir ifadeyle, pelet makinesinin belirli bir rejimde çalışabilmesi ve kalıp deliklerinde tıkanmanın yaşanmaması için hammadde akışının belirli bir düzeyde ve sürekli olması gerekmektedir. Bu nedenle buhar düzeyi arttıkça pelet makinesi elektrik motorunun akım düzeyi düşmüştür, akım düzeyini 30-32 Amper düzeyinde sabit tutarak sabit rejimde pelet üretimi için hammadde besleme miktarının artırılması gerekmektedir. Artan buhar düzeylerinde hammadde miktarının artırılması, birim zamanda kalıpla temas eden hammadde yoğunluğunu arttırmıştır. Bu durum kalıbın daha yoğun bir şekilde sürtünmeye maruz kalmasına neden olmuştur. Her ne kadar buhar uygulaması kalıp içerisinde hammadde akışını kolaylaştırırsa da yüksek miktardaki hammadde akışından meydana gelen sürtünme kalıp sıcaklıklarını arttırmıştır.

Hammadde bazında kalıp sıcaklıkları incelendiğinde, zeytin budama artıkları için kalıp sıcaklığı sera domates artıklarınınkinden yüksek çıkmıştır. Bu durum, odunsu, iri ve sert partiküllü olan zeytin budama artıklarının kalıpta daha fazla sürtünme oluşturduğu

görüşünü doğrular niteliktedir. Çalışmada elde edilen sonuçlara benzer nitelikte, Holm vd. (2006) odunsu yapıdaki hammaddeyle yapılan peletleme işleminde sürtünmeden kaynaklı kalıp sıcaklığının arttığı, hammadde beslemesinde sorunlarla karşılaşıldığı ve bazı kalıp deliklerinin tıkanıldığını bildirmiştir. Yazar aynı zamanda, sert/odunsu hammaddenin yumuşak yapıli hammaddeye göre pelet formu kazanması için daha yüksek basınç gerektirdiğini bildirmiştir.

Buharsız pelet üretiminde, zeytin budama artıklarının özgül enerji tüketimi 225.5 kWh/ton iken, otsu yapıdaki domates bitkisi artıklarının özgül enerji tüketimi 207.3 kWh/ton olarak hesaplanmıştır. Zeytin budama artıklarının peletlenmesinde odunsu yapıdan kaynaklanan sürtünmeye bağlı kalıp sıcaklığı artışı, peletleme işleminde daha çok güç gerektirmiştir. Zeytin budama artıklarının peletlenmesinde gerçekleşen düşük üretim kapasitesi ve yüksek güç tüketimi, domates bitkisi artıklarına göre özgül enerji tüketiminde artışa sebep olmuştur.

Yapılan çalışmalarda çeşitli hammaddelerin peletlenmesi sırasında üretim kapasitesi ve özgül enerji tüketimi değerleri, hammadde çeşidi, peletleme koşulları ve pelet makinesi özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. (Vukmirović vd. 2010) pelet formunda hayvan yemi üretiminde, sıcak buhar kademesinin artışıyla özgül enerji tüketimi değerlerinin 46.25 kWh/ton'dan 42.50 kWh/ton'a gerilediğini bildirmiştir. Jackson vd. (2016) otsu yapıdaki fil otu (*Miscantus x giganteus*) ve dallı darının (*Panicum virgatum* L.) artan nem içeriklerinde peletlenmesinde özgül enerji tüketimi değerleri 101-324 kWh/ton aralığında hesaplanmıştır. Yazar, pelet makinesinin enerji tüketimindeki artışın temel sebebinin hammaddenin kalıpta yarattığı sürtünme olduğunu bildirmiştir. Tumuluru (2015)'nun çalışmasında, mısır sapının buharsız peletleme işleminde özgül enerji tüketimi değeri en yüksek 275 kWh/ton olarak hesaplanmıştır. Sıcak buhar uygulaması özgül enerji tüketimi değerini 100 kWh/ton'un altına düşürmüştür. Benzer şekilde Vukmirović vd. (2010), pelet formunda hayvan yemi üretiminde üç farklı düzeyde artan sıcak buhar kademelerinde özgül enerji tüketimi değerlerini sırasıyla 46.5, 43.75 ve 42.50 kWh/ton olarak hesaplamıştır.

Genel anlamda, çalışmada kullanılan tarımsal artıkların sıcak buhar yardımıyla peletlenmesinde, sıcak buharın hammaddenin peletleme ünitesine girmeden önce sıcaklığının artmasına ve buna bağlı olarak pelet kalıbından birim zamanda sıkıştırılan hammadde miktarının artışına sebep olmuştur. Hammaddenin sıcaklığının artması hammaddede yumuşamaya neden olarak ve basınç altında kolay sıkıştırılabilir nitelik kazanmasını sağlamıştır. Buhar düzeyindeki artış ve üretim kapasitesi arasında doğru, özgül enerji tüketimi arasında ters orantılı bir ilişki mevcuttur. Pelet üretimi ile ilgili elde edilen sonuçlar literatürde yer alan çalışmalarda benzerlik göstermektedir. Nanou vd. (2018), peletleme sıcaklığının artışının ligninin yapışkanlık özelliğini arttırarak hammaddenin daha etkin sıkışmasını sağladığını bildirmiştir. Başka bir çalışmada pelet üretimi sırasında sıcak buhar uygulamasının pelet makinesinin enerji tüketimini düşürdüğü bildirilmiştir (Evans vd. 2021). Otsu yapıdaki bağ budama artıkları ve odunsu yapıdaki meşenin peletlenmesinde, enerji tüketimi ve üretim kapasitesi açısından peletleme verimliliklerinin sırasıyla %93 ve %65 olduğu bildirilmiştir (Miranda vd. 2011).

Öğütülmüş lignoselülozik biyokütlenin sıkışma karakteristiklerinin temel göstergeleri selüloz ve lignin içerikleridir. Genel görüşe göre, biyokütlenin selülozik yapısı sıkışma yeteneklerini zorlaştırırken, lignin içeriği yapışkanlık özelliği sayesinde kolay sıkışma sağlanmakta ve sıkışık yapı korunmaktadır. Çalışmada kullanılan hammaddelerin lignin ve selüloz içerikleri incelendiğinde sera domates sapı artıklarının lignin içeriklerinin düşük, selüloz içeriğinin yüksek, zeytin budama artıklarının selüloz içeriğinin düşük, lignin içeriğinin yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 4.1). Lignoselülozik yapıya göre, pelet üretimi sırasında zeytin budama artıklarının yüksek üretim kapasitesi ve düşük enerji tüketimi değerlerine sahip olması beklenmektedir. Elde edilen sonuçlara göre bu durumun tam tersi mevcuttur. Hammaddelerin eşit koşullarda öğütülmesine rağmen çoğunlukla dal ve kısmen yapraklardan oluşan zeytin budama artıkları, iri/sert ve odunsu partiküllere sahiptir. Bu nedenle peletleme sırasında lignin içeriği sıkışma karakteristiklerine etkin bir şekilde yansımamıştır. Sera domates artıkları ise otsu, ince partiküllü yapıdadır. Bu nedenle kolay sıkışma davranışı göstererek üretim kapasitesi ve enerji tüketimi açısından daha verimli bir peletleme işlemi gerçekleşmiştir.

Sıcak buharla peletleme sırasında sera domates artıkları ve zeytin budama artıkları farklı peletleme karakteristikleri göstermiştir. Elde edilen sonuçlara ve peletleme denemelerindeki gözlemlere göre, sera domates bitkisi artıklarının ince partiküllü ve otsu yapıda olması sıcak buharın hammaddeye homojen bir biçimde nüfuz etmesini sağlamıştır. Böylece sıcak buhar kademesinin artışı üretim kapasitesinde doğrusal bir artışa, özgül enerji tüketiminde ise doğrusal bir azalmaya sebep olmuştur. Hammadde partiküllerinin sıcak buharla etkileşimi üzerine Tumuluru vd, (2011), ince formda öğütülmüş hammaddenin yüzey alanının fazla olması nedeniyle sıcak buharın peletleme üzerine daha etkin rol oynadığını, jelatinizasyon ve yapışkanlık etkinliğini arttırdığını bildirmiştir.

Zeytin budama artıklarının odunsu ve sert yapıda oluşu buharsız peletleme işleminde oldukça fazla enerji tüketimine ve düşük üretim kapasitesine neden olurken, sıcak buhar uygulamasında üretim kapasitesi artmış, özgül enerji tüketimi düşmüştür.

Artan sıcak buhar düzeylerine göre, pelet üretim verimliliği açısından sera domates sapı artıklarında B3 düzeyi oldukça etkin rol oynarken, zeytin budama artıklarında B1 düzeyinden sonra üretim verimliliğindeki artışta azalma meydana gelmiştir. Genel değerlendirmede, sera domates artıklarından sıcak buhar yardımıyla mevcut koşullarda verimli peletleme sağlandığı, zeytin budama artıklarının ise üretim kapasitesini ve enerji tüketim verimliliğini maksimize etmek için daha ince formlarda öğütülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Artan sıcak buhar düzeylerinde sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıklarından elde edilen peletlere, artan sıcaklıklarda torefikasyon işlemi uygulanmış olup, sera domates sapı peletlerin görünümüleri Şekil 4.4'de, zeytin budama artıkları peletlerinin görünümüleri Şekil 4.5'de yer almaktadır.



Şekil 4.4. Artan buhar düzeyleri (B0, B1, B2, B3) ile peletlenmiş ve artan sıcaklıklarda (T0, T1, T2, T3) torefiye edilmiş sera domates sapı artıkları peletleri



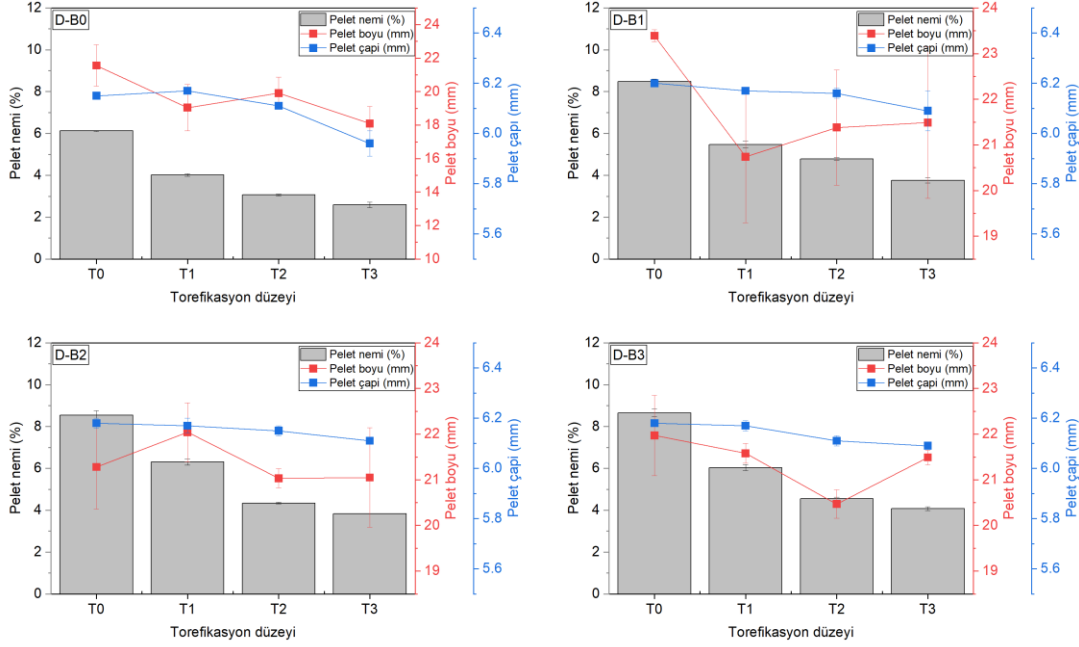
Şekil 4.5. Artan buhar düzeyleri (B0, B1, B2, B3) ile peletlenmiş ve artan sıcaklıklarda (T0, T1, T2, T3) torefiye edilmiş zeytin budama artıkları peletleri

4.3. Pelet Fiziksel Özellikleri

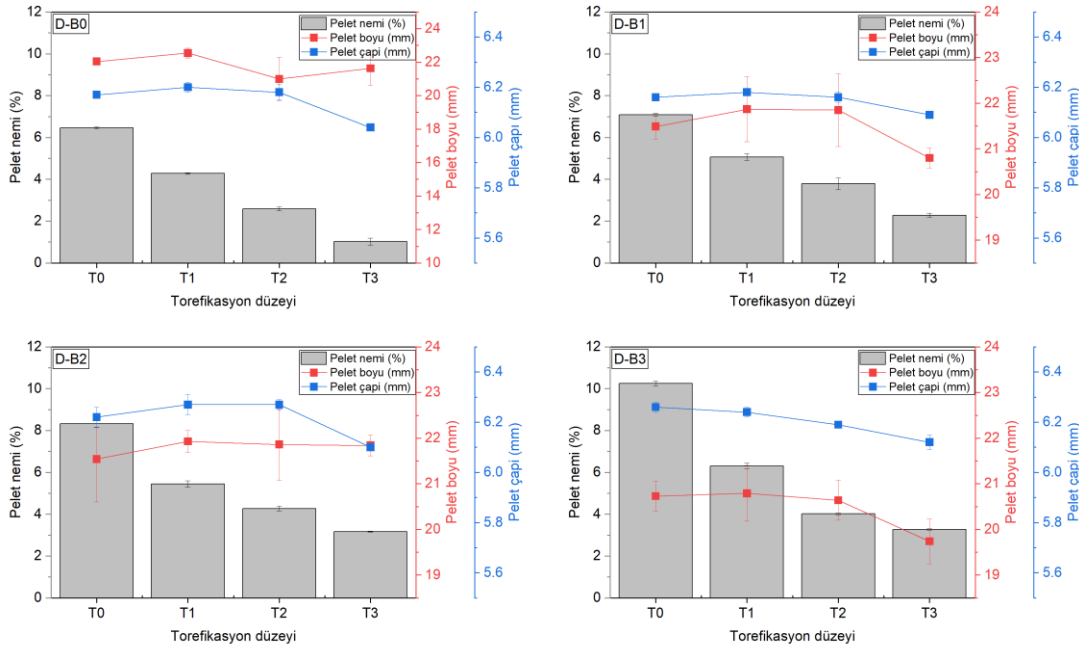
Sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıklarının üç farklı artan buhar düzeylerinde peletlenmesi ve üç farklı sıcaklıkta torefiye edilmesi sonucu elde edilen peletlerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

Peletleme ve torefikasyon koşullarına göre sera domates sapı artıklarının pelet fiziksel özelliklerinden pelet nemi, pelet boyu, pelet çapı ve pelet kütlesi değişimleri sera domates artıkları için Şekil 4.6'da, zeytin budama artıkları için Şekil 4.7'de yer

almaktadır. Ayrıca, değişken sıcak buhar düzeyi ve torefikasyon düzeylerinde elde edilen pelet nemi, pelet boyu ve pelet çapı değerlerinin 3B grafik üzerinde gösterimi sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletleri için sırasıyla EK-22 ve EK-25’de yer almaktadır.



Şekil 4.6. Domates sapı peletlerinin kademeli sıcak buhar uygulaması ve torefikasyon sıcaklığına göre değişen nem içerikleri ve boyutları



Şekil 4.7. Zeytin budama artığı peletlerinin kademeli sıcak buhar uygulaması ve torefikasyon sıcaklığına göre değişen nem içerikleri ve boyutları

Peletlerin nem içeriği, yanma performansları, depolama koşulları ve fiyatlarının belirlenmesi açısından önem arz etmektedir (Nyström ve Dahlquist 2004). Yanma sırasında ısı enerjisi, ilk etapta pelet nemini buharlaştıracağından pelet nemi peletlerin yanma performansına etki eden etmenlerin başında gelmektedir (Gil vd. 2010).

Çeşitli hammaddelerin peletlenmesi sırasında optimum peletleme neminin belirlendiği çalışmalarda, hammadde nemindeki artışın doğrudan pelet nemlerinde artışa neden olduğu, ideal peletleme neminin aşılması durumunda pelet neminin artmasının yanı sıra pelet fiziksel yapısında da bozulmaların gerçekleştiği bildirilmiştir (Agar vd. 2018; Huang vd. 2017; Stelte vd. 2019; Yılmaz vd. 2020, Yılmaz vd. 2021a; Yılmaz vd. 2021c).

Sıcak buhar uygulaması, hammaddenin peletlenmesini kolaylaştırmanın yanı sıra nemlendirilmesi de sağlanmaktadır. Bu nedenle sıcak buhar uygulanan peletleme işleminde, buharsız peletlemeye göre pelet nemlerinde artış meydana gelmektedir. Pelet nemi, doğrudan hammadde nemiyle ilişkili olmayıp hammadde özellikleri, hammadde besleme miktarı, sıcak buhar kapasitesi, kalıp sıcaklığı gibi etmenler de belirleyici faktörler arasındadır.

Çalışmada elde edilen verilere göre, sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının değişken buhar düzeylerinde (B0, B1, B2, B3) hammadde ortalama nem içerikleri sırasıyla 12.85 ± 0.07 , 16.45 ± 0.07 , 16.80 ± 0.14 , 18.15 ± 0.49 'dir. Buhar kademelerine göre pelet nemleri sera domates bitkisi artıkları için sırasıyla 6.12 , 8.48 , 8.54 ve 8.65 , zeytin budama artıkları için 6.46 , 7.08 , 8.31 , 10.26 olarak hesaplanmıştır. Hammadde nemi (peletleme nemi) dayanıklı pelet elde etme ve stabil pelet üretimi için önemli faktörlerin başında gelmektedir. Hammadde çeşidi ve diğer peletleme koşullarına göre değişkenlik göstermekle beraber, peletleme sırasındaki güç tüketimi, pelet fiziksel kaliteleri ve depolama koşulları dikkate alındığında ideal hammadde nem içeriğinin genellikle $11-13$ düzeylerinde olduğu bildirilmiştir (Samuelsson vd. 2012). Yüksek hammadde nemi, hammaddenin kalıp deliklerinde sıkışma etkinliğini düşürerek zayıf yapılı, silindirik formdan uzak ve heterojen özellikte pelet üretimine neden olur. Bu çalışmada kullanılan hammaddeler ve peletleme koşullarına benzer nitelikte, pamuk ve susam sapı peletlerinde 15 ve 20 (Yılmaz vd. 2020), kavun sapı peletlerinde 15 (Yılmaz vd. 2021a), palmiye budama artıkları peletlerinde 18 (Yılmaz vd. 2021b), arpa samanı peletlerinde 23 (Serrano vd. 2011), kayın ağacı, buğday samanı ve kamış, peletlerinde 13 , 16 ve 16 (Larsson vd. 2021) ve zeytin budama artıkları peletlerinde 16 (Koçer ve Kürklü, 2020) düzeyindeki nem içerikleri yüksek nem içeriği olarak bildirilmiştir. Bahsi geçen çalışmalarda, nem içeriğinin yüksek olduğu çıkarımı, pelet nemlerinin ENplus (2015)'de ve ISO/TS 17225-8 (2016)'da bildirilen nem sınır düzeyini (10) aşması ve pelet yoğunluklarının ve mekanik dayanıklılıklarının ideal nem içeriğine göre azalış göstermesi ve düzgün olmayan yapıda pelet elde edilmesi sonuçlarına göre yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan yola çıkarak genel bir ifadeyle 15 'i aşan hammadde nemlerinde ideal peletleme neminin aşılabacağı ve daha düşük kaliteli, yüksek nem içeriğine sahip peletler elde edileceği ön görülebilir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, sıcak buhar uygulamasından kaynaklanan hammaddedeki nem içeriği artışı, buharsız-yüksek nem içeriğindeki peletleme işlemindeki gibi pelet nem içeriklerinde beklenen artışa neden olmadığı görülmektedir. En yüksek buhar düzeyi olan B3'de hammadde nem içeriklerinin 18

düzeyine çıkmasına rağmen pelet nemleri sera domates bitkisi artıklarında %8.65, zeytin budama artıklarında %10.26 düzeyindedir. Bu durum, hammaddenin yüksek nem içeriğinde olmasına rağmen hammadde sıcaklığının ve kalıp sıcaklığının nemi hızlı bir biçimde buharlaştırdığını, dolayısıyla hammadde neminin peletlere nüfuz etmeden pelet üretimi sağladığını göstermektedir. Farklı hammaddelerle sıcak buhar uygulaması olmadan yapılan peletleme işlemlerinin yer aldığı çalışmalarda, %12-25 hammadde nem içeriğinde üretilen peletlerin nem içerikleri %11-16 düzeyindedir (Talero Rojas vd. 2016; Yılmaz vd. 2020). Sıcak buharlı peletlemenin yapıldığı çalışmalarda ise hammadde nem içeriğinin yüksek olmasına rağmen pelet nemlerinin oldukça düşük elde edildiği görülmüştür. Berghel vd. (2013), hammadde neminin %12.2-%12.7 olduğu aralıkta pelet nemlerinin %5-9 aralığında değiştiğini bildirmiştir. Genel değerlendirmede sıcak buharlı peletleme işleminde hammadde neminde meydana gelen artışın peletlere yüksek oranda yansımadağı, ENplus (2015) ve ISO/TS 17225-8 (2016) 'da sınır değeri olarak belirtilen %10 düzeyinin altında kaldığı görülmektedir.

Sera domates bitkisi artıkları ve zeytin budama artıklarının aynı koşullarda yapılan peletleme işlemindeki nem içerikleri incelendiğinde, B0, B1, B2 düzeylerinde ciddi bir farklılık bulunmazken, B3 düzeyinde zeytin budama artıklarının daha yüksek nem içeriğinde (%10.26) olduğu görülmektedir. Bu durum, zeytin budama artıklarının B3 düzeyinde peletlenmesi sırasındaki düzensizlikten ve iri partiküllere sahip hammaddenin yüzeyine yapışan su moleküllerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Torefikasyon sıcaklığının artışı tüm peletleme koşullarında pelet nemlerinin düşmesine sebep olmuştur. Torefikasyon sırasında sıcaklığa maruz kalan peletlerde uçucularla birlikte nem içeriğinin de uzaklaştığı, nem kaybının sıcaklık düzeyi ve tepkime süresiyle doğru orantılı olduğu yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Cen vd. 2020; Garcia vd. 2018; Mohd Faizal vd. 2018).

Bu çalışmada elde edilen sera domates sapı peletlerinde, artan T1 (220 °C), T2 (250 °C), T3 (280 °C) torefikasyon sıcaklıklarında, buharsız (B0) pelet üretiminde pelet nem içerikleri sırasıyla %4.02, %3.06, %2.59 olarak hesaplanmıştır. Torefiye edilmemiş peletlerin (B0-T0) nem içerikleri %6.12 düzeyindedir. D-B0-T0 peletlerine göre, T1, T2 ve T3 düzeylerindeki torefikasyon işleminde pelet nemleri sırasıyla %34.31, %50.00 ve %57.68 oranında azalmıştır. B1 düzeyindeki buhar ile üretilen sera domates sapı peletlerinde, T1, T2 ve T3 torefikasyon koşullarında pelet nemi değerleri sırasıyla %5.47, %4.78 ve %3.75'dir. B1 düzeyindeki torefiye olmamış peletlerin (B1-T0) nem değerlerine göre (%8.48), torefikasyon düzeyi pelet nemlerinde sırasıyla %35.50, %43.63 ve %55.78 oranında azalma göstermiştir. B2 buhar düzeyinde üretilen sera domates sapı peletlerinin T1, T2 ve T3 torefikasyon düzeylerindeki nem içerikleri sırasıyla %6.31, %4.34 ve %3.84'tür. D-B2-T0 peletlerinin nem içerikleri %8.65 olup, artan torefikasyon sıcaklığına göre nem içeriklerinde %26.11, %49.18 ve %55.04 oranında düşüş gerçekleşmiştir. En üst düzey buhar koşulu olan B3 düzeyinde T1, T2 ve T3 koşullarında pelet nemleri %6.04, %4.55 ve %4.08 olarak hesaplanmıştır. D-B3-T0 düzeyinde %8.65 olan pelet nemi, artan torefikasyon sıcaklıklarına göre sırasıyla %30.17, %47.40 ve %52.83 oranında düşüş göstermiştir.

Pelet üretimi aşamasından itibaren değerlendirildiğinde, buhar düzeyi hammaddenin nem içeriğinde artışa sebep olarak peletlerin buharsız üretim koşullarına göre daha yüksek nemli üretilmesine neden olmuştur. Artan nem içeriğindeki peletler, belirtilen sıcaklıklar ve sabit kalma süresinde (15 dakika) torefikasyona maruz bırakıldığında nem kaybı daha düşük düzeyde seyretmektedir. Diğer bir deyişle, buhar düzeyindeki artış, torefikasyon sıcaklığının peletlerdeki nem kaybı üzerine olan etkisini düşürmüştür.

Pelet nemindeki artışın torefikasyon sonrası pelet nemi üzerine etkisi Cen vd. (2020)'nin çalışmasında bildirilmiştir. Çalışmada, çeltik sapı ve çam artıkları peletlerine 210, 240, 270 ve 300 °C'de torefikasyon işlemi uygulanmıştır. %10 nem içeriğine sahip çeltik sapı peletlerinde pelet nemleri torefikasyon sıcaklıklarına göre sırasıyla, %8, %7, %5 ve %4 düzeylerine düşmüştür. İşlem görmemiş %12 nem içeriğindeki çam artığı peletlerinde ise nem içerikleri %10, %8, %7 ve %4 olarak hesaplanmıştır.

Zeytin budama artıkları peletlerinde B0 buhar düzeyinde üretilen peletlerin nem içeriği %6.46 iken, torefikasyon sıcaklığına göre %33.75, %60.06 ve %84.06 düşüş göstererek sırasıyla %4.28, %2.58 ve %1.03 değerlerine düşmüştür. B1 buhar düzeyinde %7.08 olan pelet nem içerikleri artan torefikasyon sıcaklıklarındaki nem düşüş oranları %26.98, %47.03 ve %68.22 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda B1 düzeyinde pelet nemleri sırasıyla %5.17, %3.75 ve %2.25 düzeylerine gerilemiştir. B2 buhar düzeyinde %8.31 olarak hesaplanan pelet nemleri torefikasyon sıcaklığı artışıyla %5.42, %4.22 ve %3.17 düzeylerine gerilemiştir. Artan torefikasyon sıcaklığı B2-T0 peletlerine göre nem içeriklerinde sırasıyla %34.78, %49.22 ve %61.85 düşüşe neden olmuştur. En yüksek buhar düzeyi olan B3'te elde edilen pelet nemleri %10.26 olarak hesaplanmıştır. Torefikasyon sıcaklığının artmasıyla nem içeriklerinde %38.60, %60.82 ve %68.13 düşüş gerçekleşerek Z-B3-T1, Z-B3-T2 ve Z-B3-T3 peletlerinde pelet nemleri sırasıyla %6.30, %4.02 ve %3.27 olarak hesaplanmıştır.

Domates sapı peletlerinde olduğu gibi zeytin budama artıkları peletlerinde de buhar düzeyi artışı hammadde neminin artışına, dolayısıyla pelet nemlerinde artışa neden olmuştur.

İşlem görmemiş peletlere göre, torefiye edilen peletlerin nem içeriklerindeki düşüş oranı, torefikasyon etkinliği konusunda bir öngörü oluşturabilmektedir. Aynı torefikasyon koşullarında zeytin budama artıklarından uzaklaşan nem miktarı, sera domates sapı artıklarından uzaklaşan nem miktarından nispeten fazladır. Bu durum, parçacık boyut dağılımı, hammadde fiziksel özelliği ve pelet fiziksel yapısı ile ilişkilidir.

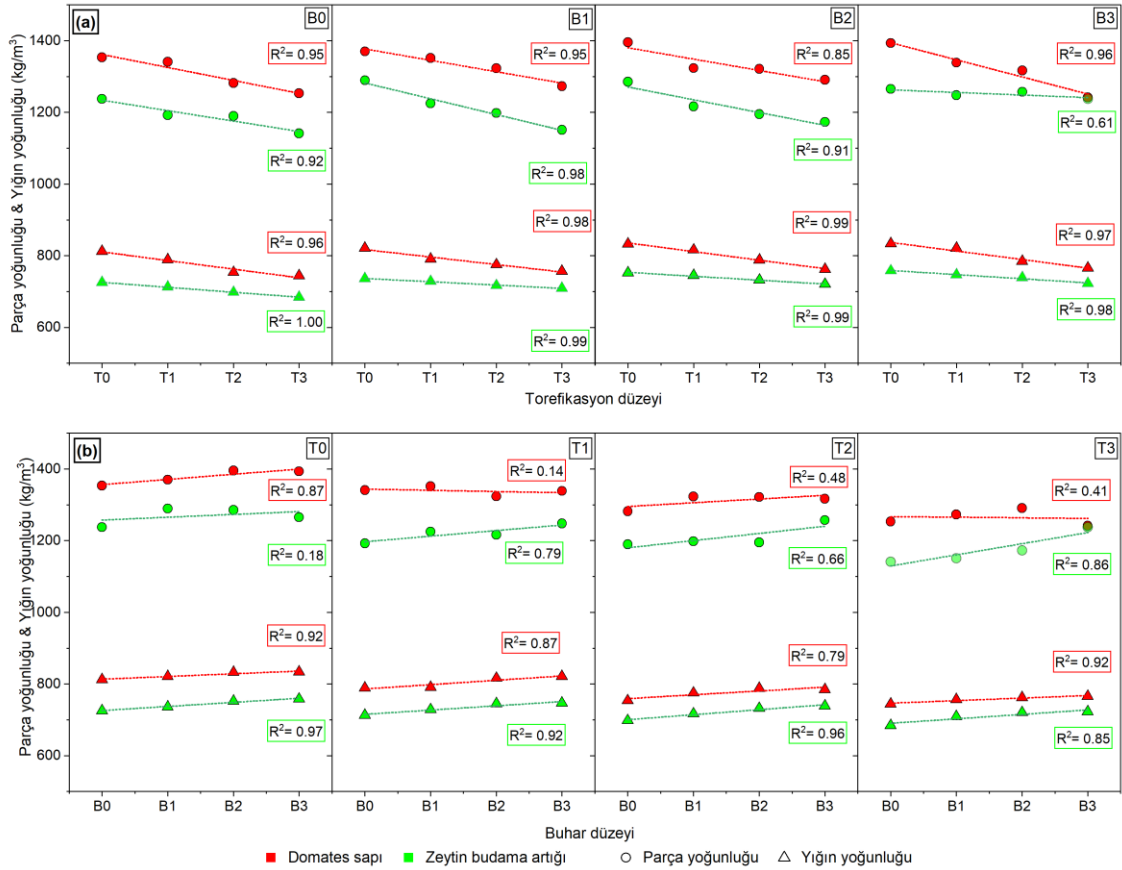
Öyle ki, zeytin budama artıklarının iri partiküllere sahip oluşu pelet oluşumu sırasında boşluklu yapıya sahip olmasına neden olmuştur. Peletin sıcaklığa maruz kaldığı sırada gerçekleşen nem kaybı eğilimi peletleme koşulları ve hammadde özelliklerinin yanında pelet fiziksel özellikleriyle de ilişkilidir. Pelet parça yoğunlukları incelendiğinde, zeytin budama artıklarının parça yoğunluklarının sera domates sapı artıklarınıninkinden daha düşük oluşu bu durumu açıklar niteliktedir. Düşük yoğunluk, torefikasyon sırasında pelet neminin kolayca boşluklu yapıdan uzaklaşmasına neden olmuştur. Benzer bir durum Yılmaz vd. (2021) çalışmasında yer almış olup, boşluklu yapıya sahip, düşük yoğunluklu peletlerin torefikasyon sırasında daha fazla nem kaybettiğini doğrulamaktadır.

Elde edilen tüm peletlerde torefikasyon sıcaklığındaki artış pelet boylarında kısalmaya ve pelet çaplarında daralmaya neden olmuştur. Torefikasyon işlemi biyokütledeki nem kaybının yanı sıra hidroksil bağlarının koparak peleti oluşturan partiküllerin bir arada tutunma yeteneğinin de (binding affinity) zayıflamasına neden olur (Wang vd. 2020).

Torefikasyon denemeleri sonrasında, boy ve çap ölçümlerinden önce peletlerin kaplara aktarılması ve laboratuvara taşınması sırasında pelet uçlarında kırılmalar meydana gelmiştir. Bu nedenle, pelet boylarındaki kısalmanın nedeni boyuna büzülmenin yanı sıra peletlerin uçlarında meydana gelen kırılma ve ufalanmalardan kaynaklanmaktadır. Torefikasyon edilen peletlerin kırılma özelliğinin yüksek torefikasyon sıcaklıklarında daha belirgin olduğu yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir (Dyjakon vd. 2021; Nobre vd. 2015). Diğer bir açıdan, torefikasyon edilen öğütülmüş palmye artıklarının peletlenmesinde torefikasyon sıcaklığı ve süresinin artışı peleti oluşturan partiküller arası bağı zayıflattığından üretilen peletlerin daha kısa boylu olduğu bildirilmiştir (Na vd. 2013). Genel anlamda torefikasyon, biyokütlenin lignoselülozik yapısı ve fiziksel bileşenlerinde bozunma yarattığından, sıkıştırma karakteristikleri değişmekte ve sıkışık formunu koruma yetenekleri azalmaktadır. Bu çalışmada da T3 düzeyinde torefikasyon edilen peletlerin işlem görmemiş peletlere göre daha kısa boya sahip olduğu görülmüştür. Benzer bir sonuç Gilvari vd (2020) ve Yılmaz vd. (2021b)'nin çalışmalarında yer almaktadır. Araştırmacılara göre torefikasyon edilmiş peletlerin taşıma ve depolama sırasında uçlarından gerçekleşen kırılmanın pelet yığını içerisinde toz oranının artmasına, peletin ekonomik değerinin düşmesine sebep olacağını bildirmişlerdir. Fiziksel kalite ve depolama etkinliği açısından değerlendirildiğinde genel kanı uzun peletlerin daha avantajlı olduğu yönündedir. Fakat, Wöhler vd. (2017) peletlerin otomatik beslemeli bir sobada yakılması sırasında, uzun peletlerin besleme zamanını geciktirdiğini bu nedenle ısı veriminin düştüğünü, emisyon gazlarının arttığını bildirmiştir.

Torefikasyon sırasında biyokütlenin selülozik yapısındaki değişme pelet formunda diametrik (enine) büzülme sebebinde olmuştur. Buhar düzeyine göre peletlerin çapında istatistiksel olarak bir farklılık gözlemlenmemiş, fakat artan torefikasyon sıcaklıklarında her iki hammaddede çap değerlerinde azalma gerçekleşmiştir. Riaz vd. (2021), peletlerin torefikasyonunda, torefikasyon sıcaklığının artışıyla hidroksil gruplarında (OH⁻) bozunmanın gerçekleştiğini, bunun sonucu olarak peletin sıkışık formunda bozunma yaşandığını ve diametrik büzülme eğiliminde olduklarını bildirmiştir. Yazar, farklı peletler üzerinde yaptığı denemeler sonucunda torefikasyon işlemiyle daha fazla diametrik büzülme uğrayan peletlerin ortamdaki su alma kapasitesinin daha yüksek olduğunu bildirmiştir.

Sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerinin pelet parça yoğunlukları ve yığın yoğunlukları değerlerinin sıcak buhar düzeyi ve torefikasyon sıcaklığına göre değişimi Şekil 4.8'de yer almaktadır. Pelet kütlesi, parça yoğunluğu ve yığın yoğunluğu değerlerinin 3B grafikte değişken sıcak buhar düzeyi ve torefikasyon düzeylerindeki konumları sera domates sapsı ve zeytin budama artıkları için sırasıyla EK-23 ve EK-26'da yer almaktadır.



Şekil 4.8. Domates sapı ve zeytin budama artığı peletlerinin parça yoğunluğu ve yığın yoğunluğu değerlerinin a) farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, b) farklı torefikasyon sıcaklığı için buhar düzeylerine bağlı değişimi

Sıcak buhar uygulaması, sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerinin sıkışma karakteristiklerine olumlu etki sağlayarak sıcak buharsız peletleme işlemine göre daha yoğun peletler üretilmesini sağlamıştır. Sera domates sapı artıklarında buharsız (B0) ve artan buhar düzeylerinde (B1; B2; B3) elde edilen peletlerin ortalama parça yoğunlukları sırasıyla 1353.79 ± 42.25 , 1370.04 ± 2.39 , 1395.54 ± 30.78 ve 1393.55 ± 7.95 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Yığın yoğunlukları ise sırasıyla 812.01 ± 6.31 , 821.16 ± 5 , 832.43 ± 6.4 ve 833.42 ± 7.39 kg/m^3 'tür. Buharlı peletleme işlemi sırasında hammaddenin artan nem içeriği ve sıcaklığı hammaddenin yumuşamasına, peletleme ünitesinin peletleme kapasitesinin artmasına ve buna bağlı olarak pelet oluşumu sağlanırken birim zamanda daha fazla hammaddenin pelet formuna dönüşmesine yol açmıştır. Bu nedenle buharın etki ettiği hammaddeden üretilen peletler buharsız üretilen peletlere göre daha sıkışık/yoğun formdadır. Buhar düzeyinin artışı pelet parça yoğunluklarında ve yığın yoğunluklarında doğrusal oranda artışa sebep olmuştur.

Zeytin budama artıklarının B0, B1, B2 ve B3 düzeylerinde peletlenmesi sonucu parça yoğunlukları sırasıyla, 1237.40 ± 28.39 , 1289.64 ± 4.5 , 1285.11 ± 2.47 ve 1265.23 ± 12.00 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Peletlerin yığın yoğunluğu değerleri buhar düzeyine göre sırasıyla 725.44 ± 8.30 , 736.12 ± 6.95 , 752.16 ± 9.31 , 758.2 ± 8.9 kg/m^3 'tür.

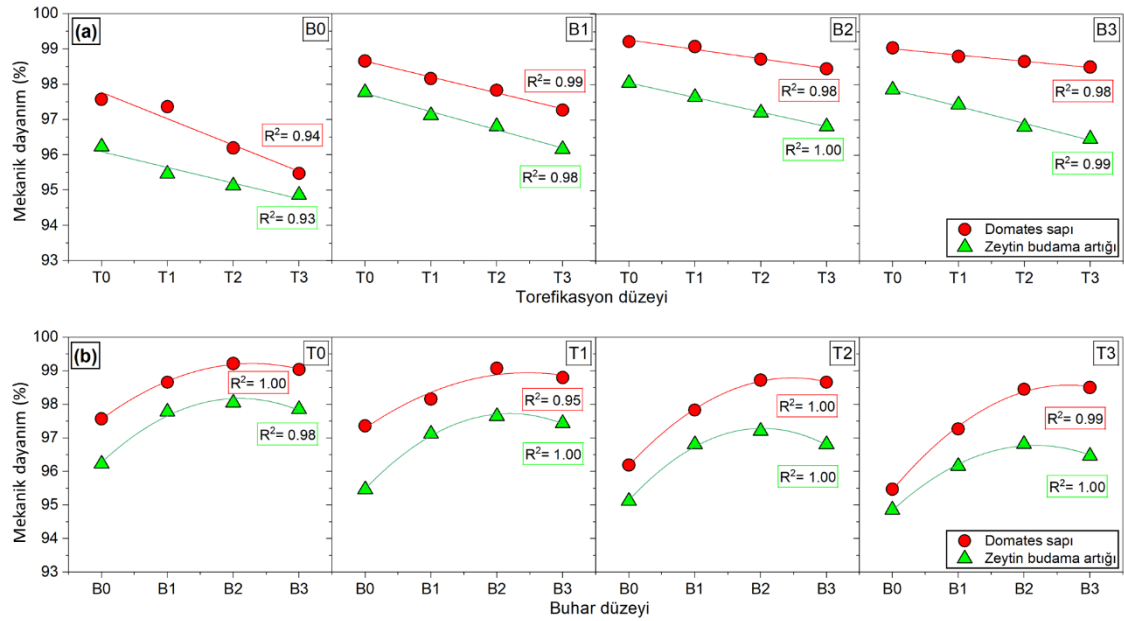
Zeytin budama artıklarının peletlenmesinde sıcak buhar uygulaması, sera domates sapı artıkları peletlerinde olduğu gibi buharsız pelet üretimine göre daha sıkışık formda pelet üretilmesine olanak sağlamıştır. Buhar düzeyinin B1, B2 düzeylerine çıkarılmasıyla parça yoğunluğu ve yığın yoğunluğu değerlerinde lineer bir artış gözlemlenirken, B3 düzeyinde parça yoğunluğu B2 düzeyine göre azalmıştır. Yığın yoğunluğu değeri ise B2 ve B3 düzeylerinde birbirine yakındır. Zeytin budama artıklarının peletlenmesinde B3 buhar düzeyi, hammaddenin fiziksel yapısı nedeniyle materyalin peletlenmesi sırasında fazla nem içermesine ve peletleme işleminin verimlilikle sürdürülmesine engel oluşturmuştur. Artan buhar düzeyinde pelet parça yoğunluğu ve yığın yoğunluğunun artması beklenirken B3 düzeyinde sabit kalma/azalma eğilimdedir. Bu durum, B3 buhar düzeyinin mevcut koşullar altında zeytin budama artıklarının sıcak buhar ile peletlenmesinde buhar düzeyinin üst sınırına ulaşıldığının göstergesidir.

Zeytin budama artıkları ve sera domates sapı artıklarının eşit peletleme koşulları altındaki yoğunluk değerleri incelendiğinde, sera domates sapı artıklarının yoğunluk değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi, sera domates sapı artıklarının otsu yapıda ve daha düşük parçacık boyutuna sahip olması nedeniyle daha verimli sıkışma karakteristikleri göstermesidir. Çünkü zeytin budama artıklarının öğütülmüş formunda iri taneli ve sert partiküller içermesi pelet formunun oluşması sırasında boşlukların tamamıyla dolmaması sonucunu doğurmuştur. Önceki çalışmalarda belirtildiği üzere, 1 mm'den büyük odun partiküllerinin sıcak buhar etkisi altında dahi partiküller arası bağın oluşması zorlaşmaktadır (Labbe vd. 2020). Öğütülme sonrasında ince partiküllü ve düşük ortalama geometrik çapa sahip hammaddede partiküllerinin yüzey alanı genişlemektedir. Hammaddenin yüzey alanının fazla oluşu buhar etki alanını artırarak jelatinizasyon ve yapışma etkinliğini artırır (Tumuluru, vd 2011). Samuelsson vd. (2009)'nun çalışmasında, çam ve ladin talaşlarının peletlenmesinde 2-6 kg/h aralığında buhar kapasitesiyle sıcak buharla peletleme işlemi yapmıştır. Buhar kapasitesi artışının peletlerin yığın yoğunluğuna yüksek derecede olumlu yönde etki ettiğini bildirmiştir. Başka bir çalışmada, sıcak buharlı pelet üretiminde, buhar kapasitesinin 2 kg/h'den 6 kg/h'e çıkarılmasıyla hammaddede daha verimli sıkışma karakteristiği gözlemlenmiştir (Samuelsson vd. 2012). Tumuluru vd. (2010), orta düzey veya çok ince öğütülmüş hammaddenin peletlenmesinde sıcak buhar uygulamasının pelet kalitesini arttırmada önemli bir etkiye sahip olduğunu bildirmiştir.

Torefikasyon işlemi, her iki hammaddede için de yığın yoğunluğu ve parça yoğunluğu değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Torefikasyon işleminde sıcaklığın artması, peletler içerisinde yer alan nem ve uçucuların uzaklaşmasına, ligninin ve selülozik yapının bozulmasına yol açar (Arias vd. 2008; Nyakuma vd. 2021; Prins vd. 2006; Sadaka ve Negi 2009). İşlem görmemiş/ham peletlere göre torefiye edilmiş peletlerin nem ve uçucu kaybından kaynaklanan kütle kaybı, lignin ve selülozik yapısındaki bozunmadan kaynaklanan şekilsel değişim peletlerin yoğunluklarında azalmaya yol açmıştır. Torefikasyon işleminden kaynaklanan çap büzülmesi ve pelet uçlarındaki kırılma pelet hacimlerinde azalmaya neden olsa da kütlede yaşanan kayıp hacimsel daralmadan yüksek olduğu için yoğunluk değerleri belirgin bir şekilde azalmıştır.

Mekanik dayanıklılık, peletlerin taşıma ve iletimi sırasında maruz kaldığı sarsıntı ve çalkalanmanın yol açtığı ufalanma düzeyinin bir göstergesidir. Sıcak buharsız üretilen peletlere göre, sıcak buhar uygulamasıyla üretilen peletlerde daha sıkışık ve yoğun

formda peletler elde edilmesi nedeniyle mekanik dayanıklılık indekslerinde artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerinin mekanik dayanıklılık indekslerinin **a)** farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, **b)** farklı torefikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi

Sera domates sapı artıkları peletlerinde artan sıcak buhar düzeyine göre (B0, B1, B2, B3) mekanik dayanıklılık indeksleri sırasıyla %97.85, %98.66, %99.22 ve %99.10 olarak hesaplanmıştır. Buhar düzeyinin artışı, hammaddenin yumuşaması ve yapışkanlık özelliğini artırarak peleti oluşturan partiküllerin daha sıkışık form kazanmasını sağlamıştır. Partiküller arası bağın güçlenmesi, mekanik dayanıklılık testinde oluşturulan fiziksel deformasyon ortamında kırılma ve ufalanmayı engellemiştir.

Şekil 4.9-a incelendiğinde, buharsız üretime göre B1 düzeyindeki buharlı peletleme, mekanik dayanıklılık indeksinde belirgin bir artışa sebep olurken, B2 ve B3 düzeyinde mekanik dayanıklılık indeksi artış miktarının azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Öyle ki mekanik dayanıklılık indeksi B3 düzeyinde %99.10 değeri ile B2 değerinden (%99.22)'den düşüktür. Bu durum, mevcut koşullardaki sera domates sapı artıklarının sıcak buharla peletlenmesinde, buhar düzeyi artışının bir düzeyden (B2) sonra mekanik dayanıklılık açısından fayda eşliğini aşmaya başladığını gösterir.

Zeytin budama artıkları peletlerinin mekanik dayanıklılık indeksleri artan buhar düzeyine göre (B0, B1, B2, B3) sırasıyla %96.23, %97.78, %98.05 ve %97.86 olarak hesaplanmıştır. Domates sapı artıklarında olduğu gibi, peletleme işlemine sıcak buhar kullanımı zeytin budama artıkları hammaddesinin sıkışma karakteristiklerine olumlu etkide bulunmuştur. Buhar düzeyine göre artan peletleme sıcaklığı ve nem içeriği, yüksek sıcaklıkta aktive olan ligninin yapışkanlık özelliğinin artarak peleti oluşturan partiküllerin birbirine bağlanmasını sağlamıştır. Buhar düzeyine göre mekanik dayanıklılık indeksinin

artış eğilimleri incelendiğinde, buharsız peletlemeye göre B1 düzeyinde mekanik dayanıklılıkta belirgin bir artışa neden olmasına karşın, B2 düzeyinde artış miktarı azalmış, B3 düzeyinde B2 düzeyinden düşük bulunmuştur. Bu durumda, zeytin budama artıklarının sıcak buhar yardımıyla peletlenmesinde, mekanik dayanıklılığın faydalı sınır değerinin B1 olduğu söylenebilir.

Şekil 4.9-b’de torefikasyon işleminin her iki hammadde ve tüm buhar düzeylerinde mekanik dayanıklılık indeksini düşürdüğü görülmektedir. Sera domates sapı artıklarının buharsız peletleme işleminde (B0) kontrol grubu (D-B0-T0) peletlerinin mekanik dayanıklılık indeksi %97.5 iken artan torefikasyon sıcaklıklarında (T1, T2, T3) mekanik dayanıklılık indeksi sırasıyla %97.36, %96.19 ve %95.47 düzeyine düşmüştür. Buhar uygulamasında torefikasyon işlemi görmemiş D-B1-T0 peletlerinin mekanik dayanıklılık indeksi %98.66 düzeyinden, artan torefikasyon sıcaklıklarına göre sırasıyla %98.16, %97.83 ve %97.27 düzeylerine gerilemiştir. Sera domates sapı artıklarının peletlenmesinde en yüksek değere sahip olan D-B2-T0 peletlerinin mekanik dayanıklılık indeksi %99.22’den, artan torefikasyon sıcaklıklarında %99.08, %98.72, %98.45 düzeylerine düşmüştür. En yüksek sıcak buhar düzeyinde elde edilen torefiye edilmemiş sera domates sapı artıkları peletlerinde (D-B3-T0) mekanik dayanıklılık indeksi %99.04’den torefikasyon sıcaklıklarına göre %98.80, %98.66 ve %98.50 düzeylerine düşmüştür.

Zeytin budama artıklarının buharsız peletleme işleminde Z-B0-T0 peletlerinin mekanik dayanıklılık indeksi %96.23, artan torefikasyon sıcaklıklarında (T1, T2, T3) mekanik dayanıklılık indeksi sırasıyla %95.46, %95.12 ve %94.86 düzeyine düşmüştür. Birinci kademe buhar düzeyinde Z-B1-T0 peletlerinin mekanik dayanıklılık indeksi %97.78’den torefikasyon sıcaklıklarına göre sırasıyla %97.12, %96.81 ve %96.16 düzeylerine gerilemiştir. İkinci düzey buharlı peletleme işleminde Z-B2-T0 peletlerinin mekanik dayanıklılık indeksi %98.05’den torefikasyon uygulamasıyla sırasıyla %97.65, %97.21 ve %96.82’ye gerilemiştir. Maksimum buhar düzeyinde ise Z-B3-T0 peletlerinin mekanik dayanıklılık indeksi %97.86’den, artan torefikasyon sıcaklıklarında %97.44, %96.81, %96.47 düzeylerine düşmüştür.

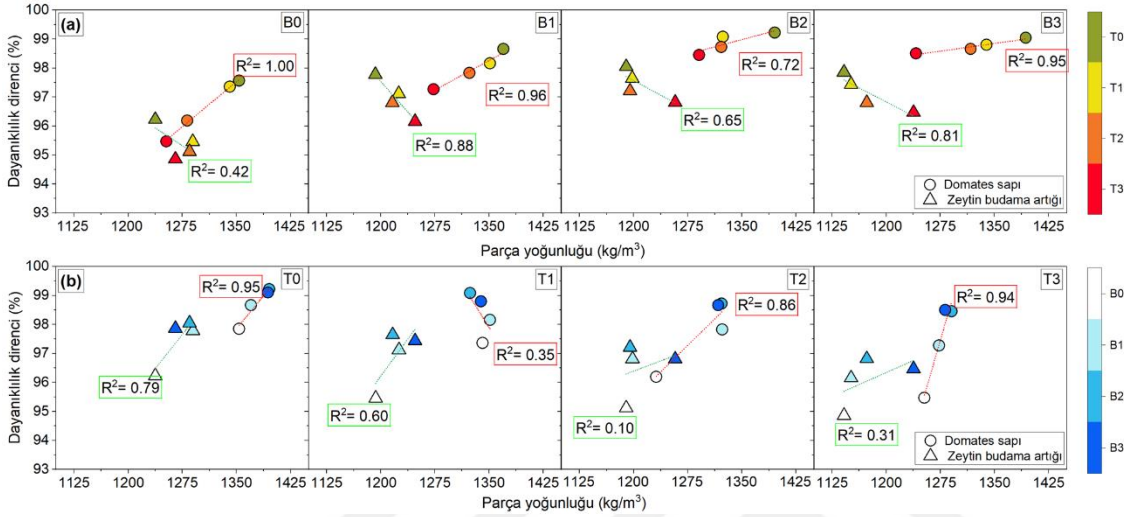
Yapılan çalışmalarda, peletlere uygulanan torefikasyon işleminin, peletlerin mekanik dayanıklılıklarını düşürmesi yaygın olarak elde edilen bir sonuçtur (Chen vd. 2016; Manouchehrinejad ve Mani 2018; Shang vd. 2012; Stelte vd. 2013; Yang vd. 2019). Artan sıcak buhar düzeylerinde elde edilen peletlere uygulanan torefikasyon işlemi, yapılan çalışmalarla paralellik göstererek olarak mekanik dayanıklılıklarında düşüşe neden olmuştur. Buharsız peletlemeye göre buhar düzeyi artışı peletlerin bireysel ağırlıklarında, dolayısıyla, yoğunluklarında artışa neden olduğundan aynı düzeyde uygulanan torefikasyon işleminin mekanik dayanıklılığı düşürme üzerine etkisi azalmıştır. Sera domates sapı artıklarında, artan buhar düzeylerine göre, kontrol grubu (B0-T0)’na göre en yüksek torefikasyon sıcaklığındaki (B0; B1; B2; B3-T3) mekanik dayanıklılık indeksleri sırasıyla %2.20, %1.43, %0.78 ve %0.55 olarak hesaplanmıştır. Zeytin budama artıklarında ise bu değer %1.44, %1.68, %1.27 ve %1.44 düzeyindedir. Mekanik dayanıklılık azalış oranlarına göre, artan buhar düzeyinin, torefikasyonun neden olduğu biyokütle genel yapısında bozunma düzeyini engeller nitelikte olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum sera domates sapı peletlerinde doğrusal yönde geçerli iken, zeytin budama artıklarında, B1-T0 ve B3-T0 peletlerinde torefikasyon işleminin mekanik dayanıklılığa etkisi birbirine yakındır. Pelet nem kaybı ve yoğunluk verilerinde olduğu

gibi B3 buhar düzeyinde zeytin budama artıklarından elde edilen peletlerin düzensiz yapısı burada da dikkat çekmektedir.

Peletlerin torefikasyonu sonucu mekanik dayanıklılıklarındaki düşüşün sebebi, biyokütle içerisindeki hemiselülozun uzaklaşması ve hücre duvarlarının parçalanması sonucu peleti oluşturan partiküller arası boşlukların oluşması ve buna bağlı olarak daha kırılabilir bir yapı kazanmasıdır (Yang vd. 2019). Torefikasyon sonucu lignin içerisinde bulunan hidroksil gruplarının kopması apolar Karbon-Karbon bağlarının artmasına, dolayısıyla parçacıkların bir arada tutunma özelliklerinin kaybolmasına neden olur (Nanou vd. 2018; Yang vd. 2019). Çizelge 4.1’de yer alan lignin içerikleri incelendiğinde zeytin budama artıklarının lignin içeriklerinin (%22.13) sera domates sapının lignin içeriğinden (%9.44) yüksek olduğu görülmektedir. Teorik olarak eşit koşullarda hazırlanan öğütülmüş biyokütleden yüksek lignin içeriğine sahip olanın sıkışma karakteristiklerinin düşük lignin içeriğine sahip olanından yüksek olması beklenir. Fakat çalışmada kullanılan hammaddelerin farklı fiziksel yapıda olmaları bu öngörüğü geçersiz kılmaktadır. Öyle ki, sera domates sapı artıkları, zeytin budama artıklarına göre düşük ortalama geometrik çap değerinde (Şekil 4.1), ince partiküllü boşluklu, yumuşak otsu yapıdadır (Şekil 3.6). Bu nedenle zeytin budama artıkları her ne kadar yüksek lignin içeriğine sahip olsa da iri/kaba odunsu partiküllere sahip olması, hammadde yüzey alanının düşük olmasına sebep olarak sıcak buharın yumuşatıcı özelliği partiküllere verimli düzeyde etki edememiştir. Bu nedenle zeytin budama artıkları ile yapılan peletleme işlemlerinde iri ve sert partiküller peletleme sırasında sürtünmeye neden olarak üretim kapasitesinin düşük, enerji tüketiminin yüksek; buharın etki verimliliğinin düşük olması sonucu parça/yığın yoğunluklarının ve mekanik dayanıklılıklarının düşük olmasına neden olmuştur.

Sıcak buharla peletlemenin, buharsız peletlemeye göre yüksek yoğunluk, düzgün silindirik yapı ve yüksek mekanik dayanıklılık sağladığı yapılan çalışmalarda bildirilmiştir. Tumuluru vd. (2011), kapsamlı bir ifade ile, yapılan sınırlı sayıda çalışma sonuçları ve endüstriyel ölçekteki üretici deneyimlerinden kanıtlandığı üzere sıcak buharla pelet üretimini üretim kapasitesini ve pelet dayanıklılığını arttıran bir ön işlem olarak tanımlamıştır. Samuelsson vd. (2012)’in çalışmasında, odun talaşlarının artan buhar düzeylerinde (2 kg/h ve 6 kg/h) peletlenmesi sonucunda peletlerin mekanik dayanıklılıklarının arttığı bildirilmiştir. Benzer şekilde, Evans vd. (2021), 74 °C ve 85 °C olarak belirlediği iki farklı sıcak buhar düzeyindeki pelet formunda hayvan yemi üretimi işleminde, buhar düzeyinin artışıyla pelet yoğunluklarının ve mekanik dayanıklılıklarının arttığını rapor etmiştir. Vukmirović vd. (2010), hayvan yemi formunda pelet üretiminde hammadde nem içeriğini arttırmak üzere uyguladığı kademeli sıcak buhar işleminde, buhar kademesinin artışıyla pelet mekanik dayanıklılıklarında artış gözlemlemiştir. Bu çalışmada elde edilen verilere benzer nitelikte bir sonuç Larsson ve Rudolfsson (2012)’un çalışmasında yer almaktadır. Çalışmada 0, 1, 2, 4 ve 6 kg/h buhar kapasitesinde buhar düzeyleriyle gerçekleştirilen çim artıklarının peletlenmesi işleminde 6 kg/h buhar kapasitesine sahip düzeyde hammadde nem içeriğinde ideal sınır aşılarak pelet üretiminde düzensizliklerin ortaya çıktığı bildirilmiştir. Yazara göre, mevcut çalışma koşullarında sıcak buharlı peletlemeden elde edilen verim ve pelet kalitesi 2-4 kg/h düzeylerinde maksimize edilmiştir. Yang vd. (2019) 1, 2 ve 4 mm parçacık boyutlarındaki öğütülmüş mısır sapı ve sakal otundan elde edilen peletlerde artan parçacık boyutunun peletleme sırasında boşluklu yapı oluşturduğunu ve mekanik dayanıklılığı düşürdüğünü bildirmiştir.

Artan düzeylerde buhar uygulamasıyla yapılan peletleme işlemlerinin verimliliği, elde edilen peletlerin yoğunluklarındaki düzenli artış ve mekanik dayanıklılıklarındaki düzenli değişim değerlendirildiğinde, pelet yoğunlukları ile mekanik dayanıklılık indeksleri arasında bir ilişki olabileceği kanısına varılmıştır. Bu nedenle, buhar düzeyi artışına göre mekanik dayanıklılık indeksi ve pelet parça yoğunluklarında meydana gelen değişim incelendiğinde, sera domates sapı artıklarında yüksek ($R^2=0.95$), zeytin budama artıklarında orta düzeyde ($R^2=0.79$) ilişki bulunmuştur (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Buhar düzeyi artışının pelet parça yoğunluğu ve mekanik dayanıklılık indeksi arasındaki ilişkinin a) farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, b) farklı torefikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi

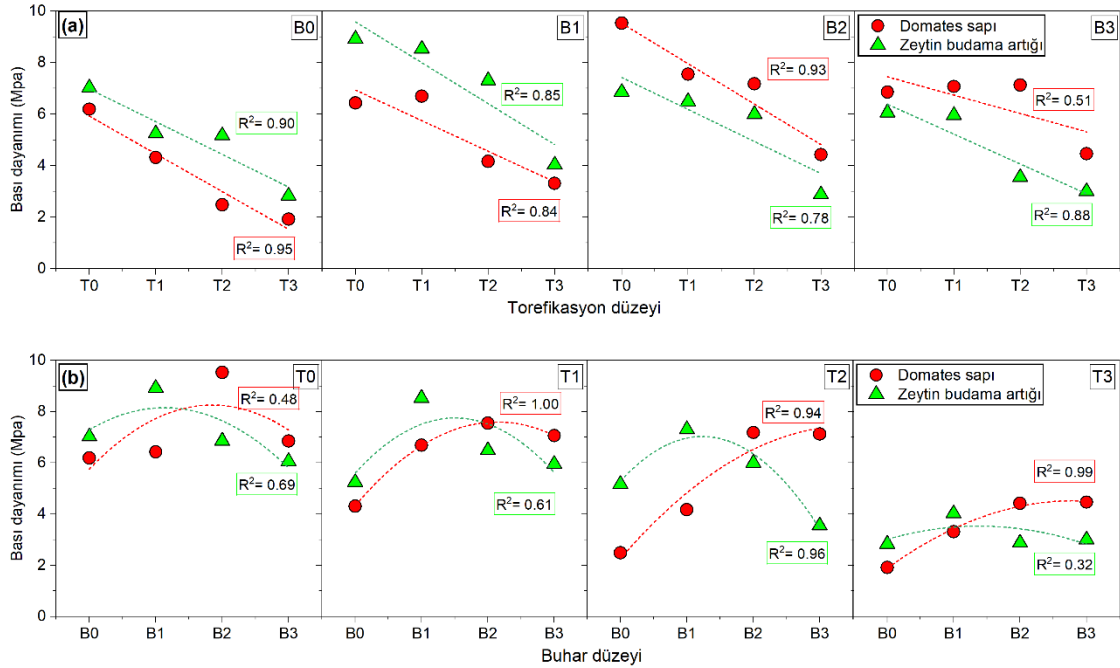
Pelet parça yoğunluğu, peletlerin sıkışma düzeyinin bir göstergesidir. Artan buhar düzeyleri, hammaddenin sıkışma etkinliğini artırarak sarsılma ve çalkalanma kuvvetlerine maruz kalınması durumunda peletlerin ufalanarak toz formuna dönüşmesini engellemiştir. Öğütülmüş sera domates sapı artıklarının düzgün parçacık boyut dağılımı göstermesi, zeytin budama artıklarına göre nispeten daha ince formda ve otsu yapıda olması buharsız ve buharlı peletleme sırasında sıkışma etkinliğini artırmıştır. Zeytin budama artıklarının odunsu, sert partiküllere sahip olması, heterojen ve boşluklu yapıda pelet üretimine neden olmuştur. Bu nedenle zeytin budama artıkları peletlerinin tüm buhar düzeylerinde parça yoğunlukları ve mekanik dayanıklılık indeksleri sera domates sapı artıklarına göre düşüktür. Parça yoğunluğu ve mekanik dayanıklılık açısından irdelendiğinde, sıcak buhar uygulaması uniform yapıdaki sera domates sapı artıklarında etkinliğini artıran oranlarda gösterirken ($R^2=0.95$), zeytin budama artıklarının hammadde fiziksel karakteristikleri nedeniyle linearitenin bozulmasına ($R^2=0.79$) neden olmuştur.

Benzer nitelikte sonuçların bulunduğu bir çalışmada, Carone vd. (2011), 1, 2 ve 4 mm elek delik açıklığında öğütülen hammaddeyi eşit koşullarda peletleme denemelerine tabi tutmuştur. Parça yoğunluğu, mekanik dayanıklılık ve bası dayanımı parametrelerinin incelendiği çalışmada, parçacık boyutunun azalmasıyla hammadde yüzey alanının artarak partiküller arası ısı transferinin kolaylaştığı, hammaddeyi oluşturan kimyasal bileşenlerin yapıştırıcı özelliğinin arttığını bildirmiştir. Yazar, parçacık boyutu artışının pelet yoğunluğu ve mekanik dayanıklılık üzerine olumsuz etkide bulunduğunu sonucuna varmıştır.

Literatürdeki yaygın görüşe göre öğütülmüş biyokütlenin sıkışma davranışlarında lignin içeriği önemli bir rol oynarken, elde edilen sonuçlara göre, hammadde fiziksel özelliklerinin de (parçacık boyut dağılımı, ortalama geometrik çap, otsu/odunsu yapı, partikül sertliği) sıkışma davranışlarında belirleyici faktörlerin başında geldiği söylenebilir.

Pelet bası dayanımı, peletlerin yük altında kırılma davranışlarını belirlemek için yararlanılan bir fiziksel testtir. Yük altındaki kırılma davranışları peletlerin üst üste depolanması sırasında ve helezonlu götürücülerde maruz kaldıkları kuvvetleri simule eder (Deng vd. 2019). Taşıma ve depolama sırasında peletlerin maruz kalabileceği yük sonucunda kırılıp parçalanmayan peletler son kullanıcıya sorunsuz ulaşabilmektedir. Sertlik değeri en yüksek olan pelet yüksek kaliteli olarak değerlendirilmektedir (Ruiz Celma vd. 2012).

Artan sıcak buhar düzeylerinde üretilen sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerine artan sıcaklık koşullarında torefikasyon uygulaması sonucu elde edilen bası dayanımı değişimleri Şekil 4.11’de yer almaktadır.



Şekil 4.11. Domates sapı ve zeytin budama artığı peletlerinin bası dayanımı değerlerinin a) farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, b) farklı torefikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi

Artan sıcak buhar düzeylerinde elde edilen sera domates sapı ve zeytin budama artığı peletlerine uygulanan torefikasyon işleminde, sıcaklığın artışıyla bası dayanımlarında düşüş gerçekleşmiştir. Buharsız pelet üretiminde, sera domates sapı artıklarında artan torefikasyon sıcaklıklarında bası dayanımları sırasıyla 6.19, 4.31, 2.48 ve 1.92 MPa olarak hesaplanmıştır. Aynı koşullar altında zeytin budama artıkları peletlerinin bası dayanımları sırasıyla 7.03, 5.25, 5.17 ve 2.83 MPa’dır.

B1 buhar düzeyinde üretilen peletlerin torefikasyonu sonucu sıcaklığa göre bası dayanımı değerleri sera domates sapı artıklarında 6.43, 6.69, 4.17 ve 3.31 MPa, zeytin budama artıklarında 8.92, 8.53, 7.31 ve 4.03 MPa olarak hesaplanmıştır.

Buhar uygulamasının B2 düzeyine çıkarılmasıyla artan torefikasyon sıcaklarına göre bası dayanımları sera domates sapı artıklarında 9.53, 7.55, 7.18 ve 4.42 MPa olarak hesaplanmıştır. Zeytin budama artıklarının B2 buhar düzeyinde peletlenmesi sonucu uygulanan torefikasyon işleminde bası dayanımları sırasıyla 6.86, 6.40, 6.00 ve 2.88 MPa düzeyinde bulunmuştur.

En yüksek buhar düzeyi olan B3 düzeyinde elde edilen peletlerin artan torefikasyon sıcaklıklarında bası dayanımları, sera domates sapı peletlerinde sırasıyla 6.85, 7.07, 7.13 ve 4.46 MPa, zeytin budama artıkları peletlerinde sırasıyla 6.06, 5.96, 3.55 ve 3.00 MPa olarak hesaplanmıştır.

Artan buhar düzeyinde buharın partiküllerde sağladığı yapışkanlık ve bir arada tutunma özelliği sera domates saplarında, tüm torefikasyon sıcaklıkları için B2 düzeyinde en yüksek değerine ulaşmıştır. B3 düzeyinde buharın sağladığı yapışkanlık etkisi devam etmesine rağmen pelet nem içeriğinin artışı peletin fiziksel dayanıklılığının azalmasına neden olmuştur. Bu nedenle B3 düzeyindeki peletler yük altında daha düşük kuvvetlerde ezilip ufalanmaya daha yatkındır.

Peletleme sırasında buhar kullanımı hammaddenin yapışkanlık özelliklerini arttırdığından buharsız peletlemeye göre bası dayanımları daha yüksek elde edilmiştir. Fakat artan buhar düzeyi, fiziksel ve lignoselülozik içerik farklılıkları nedeniyle sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıklarının peletlenmesinde farklı düzeyde etki göstermiştir. Sera domates sapı artıklarının artan buhar düzeyinde peletlenmesiyle elde edilen peletlerde, buhar düzeyi artışı B1 düzeyinde pelet sertliğinde belirgin bir artışa sebep olmazken, B2 düzeyinde sıcak buharın pelet oluşumu ve sıkışma verimliliğinde gösterdiği artış daha belirgindir. B3 düzeyinde ise sıcak buhar kapasitesi faydalı sınırı aşarak pelet nem içeriğini yükseltmiştir. Bu durum, B3 düzeyinde üretilen sera domates sapı peletlerinin daha düşük kuvvetlerde ezilip ufalanmaya yatkın olmasına neden olmuştur. Buhar düzeyinin bası dayanımına etkisi B0, B1 ve B2’de istatistiksel açıdan önemli düzeyde olup, B2 ve B3 buhar düzeyindeki bası dayanımı değerleri arasında farklılık bulunmamıştır ($p \leq 0.05$) (EK-3). Bası dayanımı açısından değerlendirildiğinde, sera domates saplarının mevcut koşullardaki peletleme işleminde B2 buhar düzeyinin kritik düzey olduğu sonucuna varılmıştır.

Zeytin budama artıkları peletlerinde buhar düzeyinin bası dayanımı üzerine etkisi istatistiksel açıdan önemli düzeydedir ($p \leq 0.05$) (EK-8). Buharsız (B0) peletlemeye göre B1 düzeyindeki buhar uygulaması kırılma ve dayanıma karşı yüksek dayanımlı pelet üretilmesi sağlamıştır. B1 buhar düzeyinde bası dayanımı B0’a göre artış gösterirken, B2 ve B3 düzeyinde buhar uygulamasında buharın zeytin budama artıkları partikülleri üzerindeki bağlayıcı etkisi azalmış, pelet nem içerikleri artarak bası dayanımlarında azalmaya neden olmuştur.

Zeytin budama artıklarının sera domates sapı artıklarına göre odunsu yapıda ve iri partiküllere sahip oluşu, yük uygulama sırasında iri partiküllerin kırılma ve dağılmaya direnç göstermesine neden olmuştur. Yapılan çalışmalarda, lignin içeriği yüksek ve

yeterli hammadde/peletleme sıcaklığına ulaşan hammaddenin verimli sıkışma davranışı gösterdiği, buna bağlı olarak yüksek yoğunluk ve yüksek sertlik değerine sahip olduğu bildirilmiştir (Abedi ve Dalai, 2017; Lisowski vd. 2019). Bu durumda düşük lignin içeriğine sahip sera domates sapı artıklarının bası dayanımı değerlerinin, zeytin budama artıklarınıninkinden küçük olması beklenmektedir. Fakat öğütülmüş hammadde fiziksel özellikleri incelendiğinde, ortalama geometrik çap değerleri, otsu/odunsu yapı ve sert partikül varlığının bu değerlendirme dışında faktörlerin olduğunu yansıtmaktadır. Özellikle B0 ve B1 düzeylerindeki peletler incelendiğinde, zeytin budama artıkları peletlerinin sera domates sapı artıkları peletlerinden daha sert olduğu görülmektedir. B2 ve B3 düzeylerinde ise sera domates sapı artıklarının kırılmaya karşı daha dirençlidir. Buharsız peletleme ve B1 düzeyindeki peletleme işleminde zeytin budama artıklarının içerisinde bulunan sert partiküller, bası dayanımı testinde peletlerin ezilmesi sırasında kırılmaya karşı direnç göstermişlerdir. B2 ve B3 düzeylerinde ise yüksek hammadde sıcaklığı ve yüksek kalıp sıcaklığı zeytin budama artıklarındaki sert partikülleri yumuşatarak B0 ve B1 düzeyine göre nispeten homojen yapıda pelet üretimi sağlanmıştır. Fakat sera domates sapı artıklarının otsu yapı karakterinde olması sıcak buhar etkinliğini yükselterek daha yoğun ve homojen pelet üretilmesine neden olmuştur. Her ne kadar lignin içeriği ve selülozik yapı hammaddenin peletleme karakteristikleri yanında pelet fiziksel yapısını etkilese de, sıcak buhar uygulamasının peletlemedeki etkinliğini tanımlama açısından lignoselülozik içeriğin tek başına yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalarda, farklı hammaddelerin değişken peletleme koşulları altında elde edilen peletlerdeki bası dayanımı/sertlik değerleri ile ilgili bazı veriler sunulmuştur. Evans vd. (2021), elde edilen sonuçlara benzer yönde, peletleme işleminde sıcak buhar uygulamasının, peletlerin dayanıklılık, sertlik ve yoğunluğunu etkileyen önemli bir ön işlem olduğunu bildirmiştir. Abedi ve Dalai (2017), çeşitli tarımsal artıklarla yapılan peletleme işleminde, kalıp sıcaklığının artırılarak ligninin yapışkanlık etkinliğini iyileştirmiştir. Çalışma sonuçlarına göre kalıp sıcaklığının 80 °C'den 120 °C'ye çıkarılmasıyla pelet yoğunluklarında %10.78 artış sağlanarak peletlerin kırıldığı maksimum kuvvet eşiği değerleri 25 N'dan 32 N'a ulaşmıştır. Lisowski vd. (2019), 2.36 mm ve 1.60 mm elek delik çapında öğütülen ceviz kabuklarını 93 °C ve 106 °C hammadde sıcaklıklarında peletlemiştir. Çalışmada, iri/sert partiküllü (2.36 mm) hammaddenin peletleme işlemi sırasında sıkışma karakteristiklerinin verimsiz olduğu, iyi kalitede peletler elde edilemediği rapor edilmiştir. Bunun yanında, hammadde sıcaklığının artışının partiküllerin yapışkanlık özelliğini artırarak pelet yoğunluğunu ve bası dayanımını arttırdığını bildirmiştir. Vukmirović vd. (2010)'e göre sıcak buhar uygulamasıyla elde edilen peletler yüksek nem içeriğine ve düşük sertlik değerine sahiptir. Whittaker ve Shield (2017)'e göre, peletleme işleminin iri/kaba formda partiküllere sahip hammadde ile yapılması pelet dayanıklılığı ve bası dayanımını azaltan bir faktördür. Carone vd. (2011), zeytin budama artıklarının 1, 2 ve 4 mm elek delik çapında öğütülüp peletlenmesiyle, artan partikül boyutunun pelet sertlik değerlerini düşürdüğünü bildirmiştir. Yazar aynı zamanda, peletlerin elastisite modülünün çekiçli değirmen elek çapı ile ters orantılı olduğunu ve küçük boyutlu partiküllerden elde edilen peletlerin elastisite modülünün, yoğunluğunun ve sertliğinin düşük olduğunu bildirmiştir. Lisowski vd. (2019), öğütülmüş kahve artıklarının peletlenmesinde düşük nem içeriği ve yüksek kalıp sıcaklığında peletlerin bası dayanımlarının maksimum düzeyde olduğunu bildirmiştir. Yazar, peletlerin bası dayanımlarının nicel karakterizasyonunun zor

olmasının nedeninin partikül boyutlarının ve hammadde şeklinin stokastik doğasından kaynaklandığı sonucuna varmıştır.

Peletlemede sıcak buhar kullanımı her iki hammadde için pelet bası dayanımlarını attırmıştır. Buharsız peletlemede sera domates sapı ve zeytin budama artıklarının bası dayanımları sırasıyla 6.19 MPa ve 7.03 MPa olarak hesaplanmıştır. Artan buhar düzeylerinde ise sera domates sapı peletlerinin basınç dayanımları 6.43, 9.53, 6.85 MPa düzeylerine ulaşmış, zeytin budama artıkları peletlerinde 8.92, 6.86 ve 6.06 MPa olarak hesaplanmıştır. Sera domates sapı artıklarında tüm buhar koşullarında torefikasyonun etkisi istatistiksel olarak önemli düzeydedir ($p \leq 0.05$) (EK-4). Zeytin budama artıkları peletlerinde B0 ve B1 düzeyinde üretilen ve tüm torefikasyon sıcaklıklarını kapsayan peletlerde bası dayanımı istatistiksel olarak aynı grupta yer almaktadır (EK-9). Bu durum, torefikasyon uygulanmamış (T0) ve en alt düzeyde torefikasyon uygulanmış (T1) zeytin budama artıkları peletlerinin bası dayanımı açısından birbiriyle benzer nitelikte olduğunu ifade etmektedir. Bir başka deyişle, torefikasyonun peletler üzerinde sağladığı kırılma etkisi T1 düzeyinde henüz oluşmamıştır.

















Genel anlamda, artan buhar düzeyi, aynı sıcaklıktaki torefikasyon koşullarında bası dayanımlarının yüksek çıkmasına neden olmuştur. Sıcak buhar uygulaması, buharsız peletlemeye göre daha yoğun ve yüksek dayanımlı peletler üretilmesini sağladığından, artan buhar düzeylerinde torefikasyon işleminin neden olduğu kırılma etkisi azalmıştır. B0, B1, B2 ve B3 buhar düzeylerinde elde edilen sera domates sapı artıkları peletlerinin T3 torefikasyon düzeyindeki bası dayanımı değerleri sırasıyla, 1.92, 3.31, 4.42 ve 4.46 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu artıştan yola çıkarak, sera domates saplarının peletlenmesinde buhar düzeyindeki artışın torefikasyon kırılmasını etkisini azalttığı söylenebilir. B0, B1, B2 ve B3 buhar düzeylerinde elde edilen zeytin budama artıkları peletlerinin T3 torefikasyon düzeyindeki bası dayanımı değerleri sırasıyla, 2.84, 4.03, 2.88 ve 3.00 MPa olarak hesaplanmıştır. Zeytin budama artıklarında buhar etkinliğinin B1 düzeyinde daha belirgin olduğu sonucuna, parça yoğunluğu ve mekanik dayanıklılık değerlerinde de değinilmiştir (Şekil 4.10). Benzer şekilde bası dayanımı testi sonuçlarına göre de torefikasyonun neden olduğu kırılma etkisine B1 düzeyinde maksimum direnç göstermiş, B2 ve B3 düzeylerinde ise torefikasyonun kırılma etkisi buharsız (B0) peletlemeye benzer özellik sergilemiştir.

Peletlerin torefikasyonunda, artan sıcaklığın peletlerdeki boşluk oranını artırdığı, buna bağlı olarak pelet sertliğini düşürdüğünü bildirmiştir (Abedi ve Dalai, 2017; Shang vd. 2012). Çalışmada elde edilen verilerle literatürdeki veriler benzerlik göstermekte olup, torefikasyon sırasında biyokütle içerisindeki lignin, selüloz ve hemiselülozda yaşanan bozunma ile peleti oluşturan bağlar zayıflayarak peletler daha kırılma bir yapı kazanmıştır. Artan torefikasyon sıcaklıklarında bozunma miktarı artarak T3 düzeyinde torefikasyon edilen tüm peletler düşük bası dayanımı değerine sahiptir. EK-24 ve EK-27'de yer alan 3B grafik yüzey deseni incelendiğinde, artan torefikasyon düzeyinin peletlerin mekanik dayanıklılığıyla bası dayanımlarına benzer yönde etki ettiği görülmektedir.

Buharsız ve buharlı peletlemede sera domates sapı peletlerinin yoğunluk, mekanik dayanıklılık gibi fiziksel özellikleri zeytin budama artıklarına göre daha üstün özelliktedir. Fakat bası dayanımı testinde B0 ve B1 düzeylerinde bu durumun tersinin geçerli olduğu görülmektedir. B0 ve B1 düzeylerinde zeytin budama artıklarının bası dayanımı değerleri sera domates saplarınınkinden yüksektir. Zeytin budama artıkları

peletlerinin bası dayanımı testinde sert ve iri partiküllerin uygulama yüküne direnç gösterdiği, böylece alınan maksimum kuvvet verilerinin pelet kırılma/ezilme eşiğini değil, partikül ezilme kuvvetini yansıttığı sonucuna varılmıştır. B2 ve B3 buhar düzeylerinde sert ve iri partiküllerin sıcak buhar ve nem içeriği nedeniyle nispeten yumuşayarak pelet içerisinde homojen etki gösterdiği söylenebilir.

Zeytin budama artıklarında, buharsız peletlemeye göre B1 düzeyindeki buhar kullanımı, partiküllerin bir arada tutunma kabiliyetini arttırarak daha yoğun ve yüksek mukavemete sahip peletler üretilmesine olanak sağlamıştır. Buhar düzeyinin B2 seviyesine çıkarılmasıyla sıcak buharın etkisinin artması beklenirken bası dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir. B2 düzeyindeki buhar uygulamasında peleti oluşturan hammaddede yer alan iri daneli partiküller buhar etkinliğini azaltarak partiküllerin yapışma özelliklerini kısıtlamıştır. Pelet nem içeriği, pelet yoğunluğu ve mekanik dayanıklılık testleri sonuçlarında da belirtildiği üzere, B2 ve B3 düzeyindeki buhar uygulaması mevcut koşullarda zeytin budama artıklarının sıcak buharla peletlemede pelet fiziksel özellikleri bakımından eşik düzeyinde olduğunun göstergesidir. Bası dayanımı testi sonrası artan buhar düzeylerinde, torefiye edilmemiş (T0) ve en yüksek torefikasyon düzeyindeki (T3) peletlerin ezilme ve parçalanma davranışlarında gözle görülür farklılıklar tespit edilmiştir (Şekil 4.12)

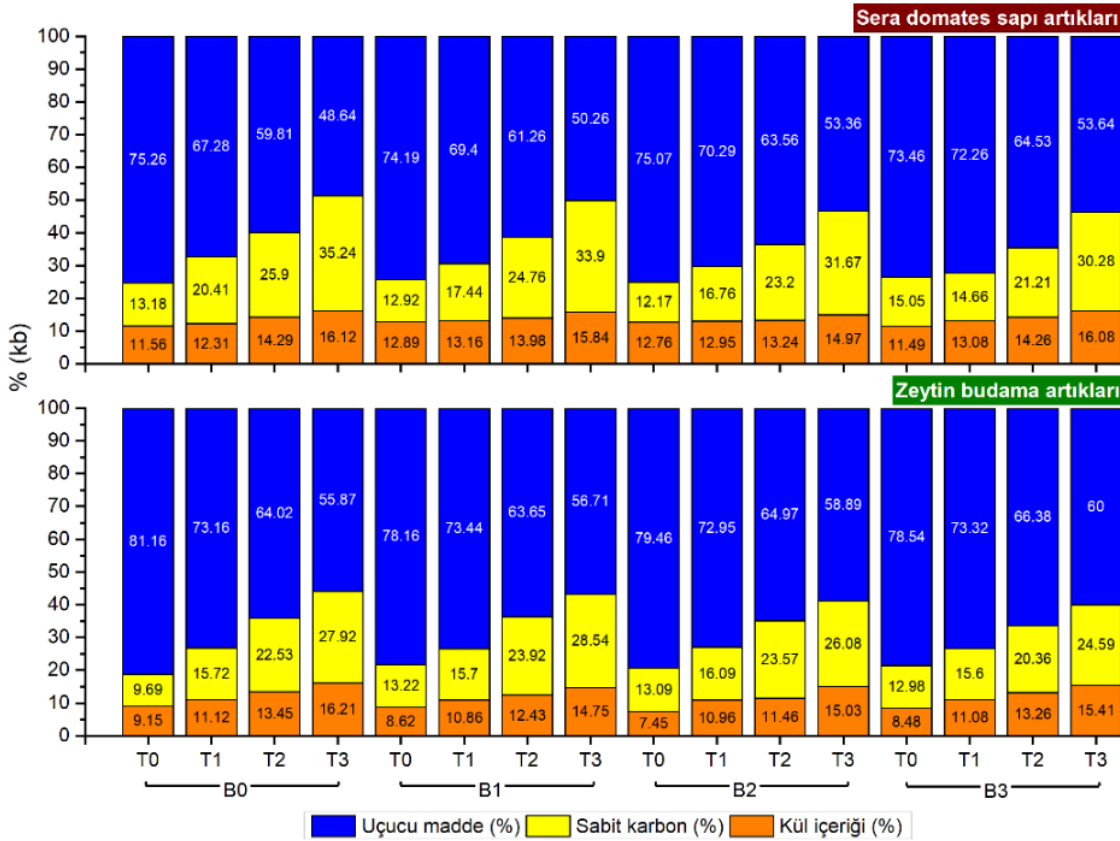
| | Domates sapı artıkları | | Zeytin budama artıkları | |
|----|---|---|--|---|
| | T0 | T3 | T0 | T3 |
| B0 |  |  |  |  |
| B1 |  |  |  |  |
| B2 |  |  |  |  |
| B3 |  |  |  |  |

Şekil 4.12. Artan buhar düzeylerinde (B0, B1, B2, B3) işlem görmemiş (T0) ve en yüksek torefikasyon düzeyindeki (T3) peletlerin bası dayanımı testi sonrası görünüşleri

Bası dayanımı test sonrası görünüşlerinin verildiği Şekil 4.12’de, buharsız (B0) üretilen peletlerin ufalanarak kırıldığı, buhar uygulanan peletlerin ise boyuna çatlama sonucu ezildiği görülmektedir. Torefikasyon işlemi uygulanan peletlerde, buharsız peletlerde dağılma gözlemlenirken, buhar uygulanmış peletlerde boyuna çatlaklardan kırılmalar gerçekleşmiştir.

4.4. Pelet Kısa (Proximate) ve Elementel (Ultimate) Analizleri

Artan buhar düzeyi ve torefikasyon sıcaklığı değişkenleri uygulanan sera domates sapı ve zeytin budama artığı peletlerinin kısa (proximate) analiz değişimleri Şekil 4.13’de yer almaktadır.



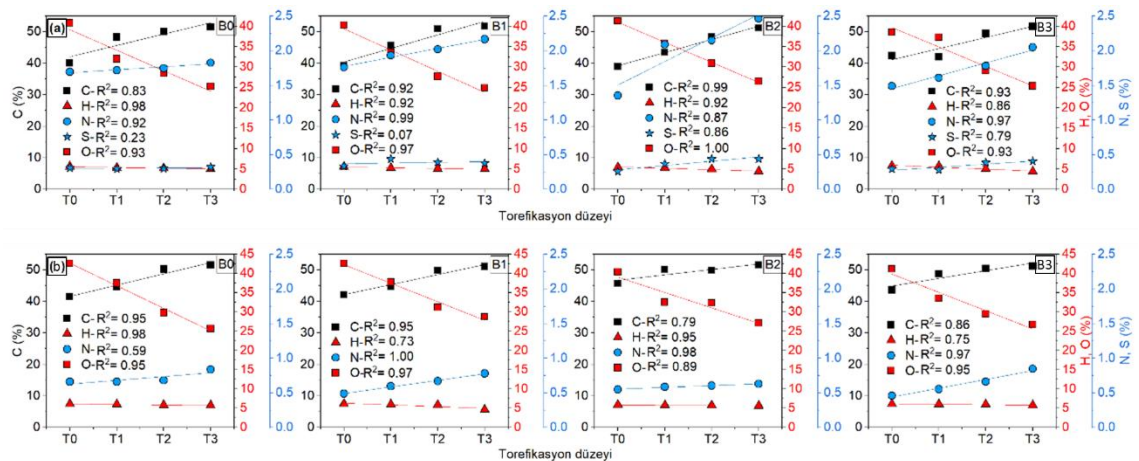
Şekil 4.13. Artan sıcak buhar düzeylerinde üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerinin kısa (proximate) analiz değerleri

Sıcak buhar düzeyine göre değerlendirildiğinde, buhar düzeyinin artışı peletlerin kül içeriği, uçucu madde miktarı ve sabit karbon miktarlarında doğrusal bir değişime neden olmamıştır. Sıcak buharla peletleme sırasında hammaddenin sıcaklığı buhar düzeyine göre 13-57 °C aralığında değişmektedir (Çizelge 4.2). Biyokütlenin yapısı gereği kül içeriği, uçucu madde miktarı ve sabit karbon miktarındaki değişimin mümkün olabilmesi moleküler yapısına etki edecek düzeyde termal bozunmanın gerçekleşeceği sıcaklık gerekmektedir. Mamvura ve Danha (2020), torefikasyon sırasında 105 °C’ye kadar biyokütlenin lignoselülozik içeriğinde termal bozunmanın henüz gerçekleşmediğini, 160 °C’den sonra hemiselülozda bozunma işleminin gerçekleşmeye başladığını bildirmiştir. Artan buhar düzeylerinde, torefiye edilmemiş sera domates sapı artıklarından üretilen peletlerin kısa analiz sonuçlarının standart sapma değerleri, kül içeriği için ± 0.75 , uçucu madde miktarı için ± 0.83 ve sabit karbon miktarı için ± 1.22 olarak belirlenmiştir. Bu durum, biyokütle örneklerinin yapısı gereği homojenitenin

kusursuz sağlanamamasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde artan buhar düzeylerinde torefiye edilmemiş zeytin budama artığı peletlerinin kül içeriği ± 0.71 , uçucu madde miktarı ± 1.34 , sabit karbon miktarı ± 1.77 standart sapma değerlerine sahiptir. Yapılan çalışmalarda zeytin budama artıklarının kül içerikleri genellikle %4-6 düzeyindedir (García-Maraver vd. 2010; Martín-Lara vd. 2017; Requejo vd. 2012). Garcia-Maraver vd. (2015)'in çalışmasında zeytin budama artıkları içerisinde yaprakların, kalın gövde parçalarının ve karışık budama artıklarının kül içerikleri sırasıyla %14.17, %1.43 ve %5.50 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan zeytin budama artıklarının kalın dal ve gövdeden ziyade ince dal, uç sürgünler ve yaprak içermesi kül içeriklerinin %8-9 dolaylarında çıkmasına neden olmuştur.

Tüm buhar düzeylerinde, torefikasyon sıcaklığının artışı kül içeriklerinde ve sabit karbon miktarlarında artışa, uçucu madde içeriklerinde düşüşe neden olmuştur. İşlem görmemiş biyokütle ürünleri genellikle %20'nin altında sabit karbon ve %80 dolaylarında uçucu madde içermektedirler (Magdziarz vd. 2017). Çalışmada, sera domates bitkisi artıklarının kül içerikleri %11-12 düzeyinden %15-16 düzeyine, sabit karbon içerikleri %12-15 düzeyinden %30-35 düzeyine çıkmıştır. Zeytin budama artıklarında ise %7-9 olan kül içerikleri ve %9-12 aralığındaki sabit karbon içerikleri sırasıyla %14-15 ve %24-28 düzeyine ulaşmıştır. Artan torefikasyon sıcaklığı koşullarında kül içeriği, sabit karbon miktarı ve uçucu madde miktarındaki değişimin literatürdeki çalışmalarla benzer nitelikte olduğu görülmüştür (Manouchehrinejad ve Mani, 2018; Rudolfsson vd. 2017; Singh ve Zondlo, 2017; Spîrchez vd. 2017; Stelte, Clemons, vd. 2011).

Torefikasyon işleminde, biyokütledeki uçucuların uzaklaşması ve lignoselülozik yapının bozunmasının yanı sıra elementel içerikte değişim meydana gelmektedir. Pirolizin bir çeşidi olan torefikasyon işleminde sıcaklık artışının elementel içerikteki en belirgin etkisi karbon içeriğinde artış, hidrojen ve düşük miktarda azalma ve oksijen içeriğinde belirgin düşüş gerçekleştirmesidir (Tumuluru vd. 2010). Sera domates sapları ve zeytin budama artıklarının artan buhar düzeyiyle peletlenmesi sonrasında, artan sıcaklıklarda torefikasyon ile elde edilen peletlerin elementel içeriklerindeki değişim Şekil 4.14'de, elementel içerikler EK-16 ve EK-17'da yer almaktadır.



Şekil 4.14. Artan buhar düzeyi ve torefikasyon düzeylerine göre a) sera domates sapı peletleri b) zeytin budama artıkları peletlerinin elementel içeriklerindeki değişim

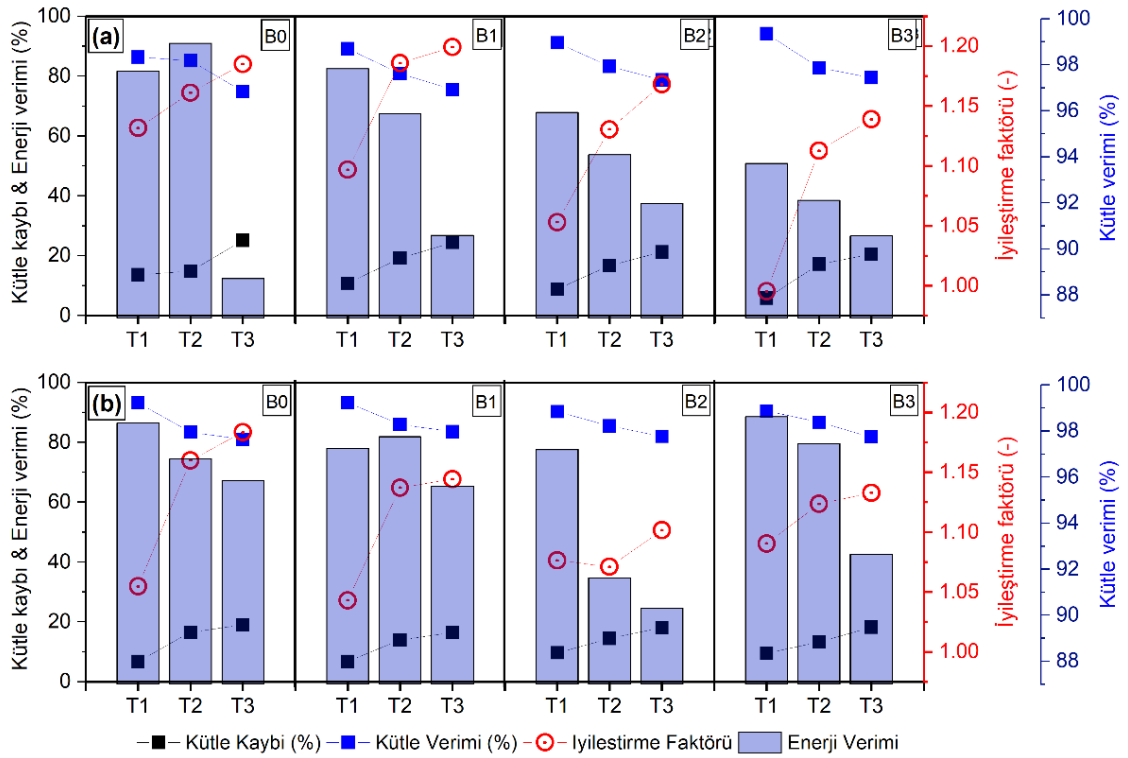
Her iki hammadde için, artan torefikasyon sıcaklığına göre oksijen ve hidrojen içeriklerinde negatif yönde, karbon ve azot içeriklerinde pozitif yönde yüksek düzeyde korelasyon ilişkisi tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda buhar düzeyi artışı ile elementel içerik değişimleri arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. Buhar düzeyi artışının kısa analiz sonuçlarına anlamlı düzeyde etki etmemesinin sebebi, elementel içerikler için de geçerliliğini korumaktadır. Sıcak buharlı peletleme işleminde, hammadde sıcaklığının biyokütlenin termal bozunma eşiğine ulaşmadığı için elementel yapısında anlamlı bir değişim meydana gelmemiştir. Fakat torefikasyon işlemi lignoselülozik yapının termal bozunma eşiğinin oldukça üstünde gerçekleşmiştir (T1:220 °C, T2:250 °C, T3: 280 °C). Bu nedenle, torefikasyon düzeyinin artışı peletlerde karbon içeriklerinde artışa, hidrojen içeriklerinde düşüşe neden olmuştur.

Sera domates sapı artığı peletlerinde dikkat çeken nokta azot ve kükürt içerikleridir. Zeytin budama artıklarında azot içerikleri %0.5-1 düzeylerinde iken, sera domates sapı artığı peletlerinde %2.5 değerine yaklaşmıştır. Bu durumla ilgili, Obernberger vd. (2006), orman ürünlerine nazaran tarımsal artıkların genellikle yüksek azot içerdiğini, çünkü yetiştiricilik sırasında kullanılan azot gübrelerinin tarımsal artıkların azot içeriğine doğrudan etki ettiğini bildirmiştir. Kükürt içerikleri incelendiğinde, zeytin budama artıklarında kükürt eser miktarda bulunurken, sera domates sapı artıkları peletlerinde %0.3-0.4 düzeylerinde gözlemlenmiştir. Sera domates yetiştiriciliğinde yetiştirme ortamının pH'sını düşürmek ve fungal/bakteriyel hastalıklarla mücadele için bitkiye farklı form ve bileşenlerde kükürt uygulanmaktadır (Dündar vd. 2017; Yaraş 2012). Benzer şekilde, azot elementi bitkilerin dönemsel olarak ihtiyaç duyduğu inorganik bir elementtir. Azot gübrelemesiyle bitkiler inorganik azotu kullanılabilir organik forma dönüştürerek bünyesine almaktadırlar (Müftüoğlu ve Demirer, 1998).

Genel anlamda, peletleme işleminde artan düzeylerde sıcak buhar kullanımının pelet elementel içeriklerinde bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Fakat, sıcak buhar düzeyinin düşük sıcaklıklarda torefikasyon işleminin gerçekleşmesine engel oluşturduğu, buhar düzeyinin artışıyla daha yoğun ve yüksek kütleyle sahip peletlerin eşit torefikasyon koşullarında torefiye olmaya direnç gösterdiği anlaşılmıştır. Hammadde çeşidi açısından değerlendirildiğinde, otsu yapıdaki sera domates sapı artıklarının düzgün parçacık boyut dağılımı ve lignoselülozik içeriği homojen ve etkin bir torefikasyonun gerçekleşmesini sağlamıştır. Zeytin budama artıklarının nispeten iri/sert partiküllü yapısı ve yüksek hemiselüloz ve lignin içerikleri, buhar düzeyinin artışıyla kararsız yapı göstermesine neden olarak elementel içeriklerinin sera domates sapı peletlerine göre doğrusallıktan sapma eğilimi yarattığı sonucuna varılmıştır.

4.5. Torefikasyon Verimliliği

Artan sıcak buhar düzeylerinde peletlenen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerinin torefikasyon verimliliklerine ilişkin grafikler Şekil 4.15'de yer almaktadır.



Şekil 4.15. Artan buhar düzeylerinde üretilen **a)** sera domates sapı artıkları ve **b)** zeytin budama artıkları peletlerinin torefikasyon verimliliklerinin torefikasyon düzeyine göre değişimi

Şekil 4.15 incelendiğinde, torefikasyon sıcaklığının artışı her bir buhar düzeyinde enerji verimi ve kütle veriminde azalmaya, kütle kaybı ve iyileştirme faktöründe artışa neden olduğu görülmektedir.

Sera domates sapı artıkları peletlerinin torefikasyon verimliliklerine ilişkin sayısal değerler EK-11’de yer almaktadır. Sera domates sapı artıklarında buharsız peletleme işleminde artan torefikasyon sıcaklığında enerji verimleri %97.72-%88.72 aralığında iken artan buhar düzeylerinde bu değer azalış göstererek en yüksek buhar düzeyinde %93.71-%90.56 düzeylerine gerilemiştir. Kütle kaybı, buharsız pelet üretiminde artan torefikasyon sıcaklıklarına göre %13.66-%25.13 aralığında hesaplanmıştır. En yüksek buhar düzeyinde (B3) ise kütle kaybında azalış meydana gelerek %5.84-%20.49 aralığında kütle kaybı gerçekleşmiştir. İyileştirme faktörü sera domates sapı için B0 düzeyinde, artan torefikasyon sıcaklıklarında 1.13-1.18 düzeyindedir. İyileştirme faktörü, buhar düzeyinin artışıyla azalış göstererek artan torefikasyon sıcaklıklarına göre 1.00-1.14 düzeyine gerilemiştir.

Zeytin budama artıkları peletlerinin torefikasyon verimliliklerine ilişkin sayısal değerler EK-13’de yer almaktadır. Zeytin budama artıklarında torefikasyon verimlilikleri, sera domates sapı peletlerine göre daha düşük düzeydedir. Buharsız peletlemede (B0) ve birinci düzey buhar kullanımında (B1) zeytin budama artıklarının enerji verimleri birbirine yakın hesaplanmış olup sırasıyla %98.35-%95.83 ve %97.24-%95.60

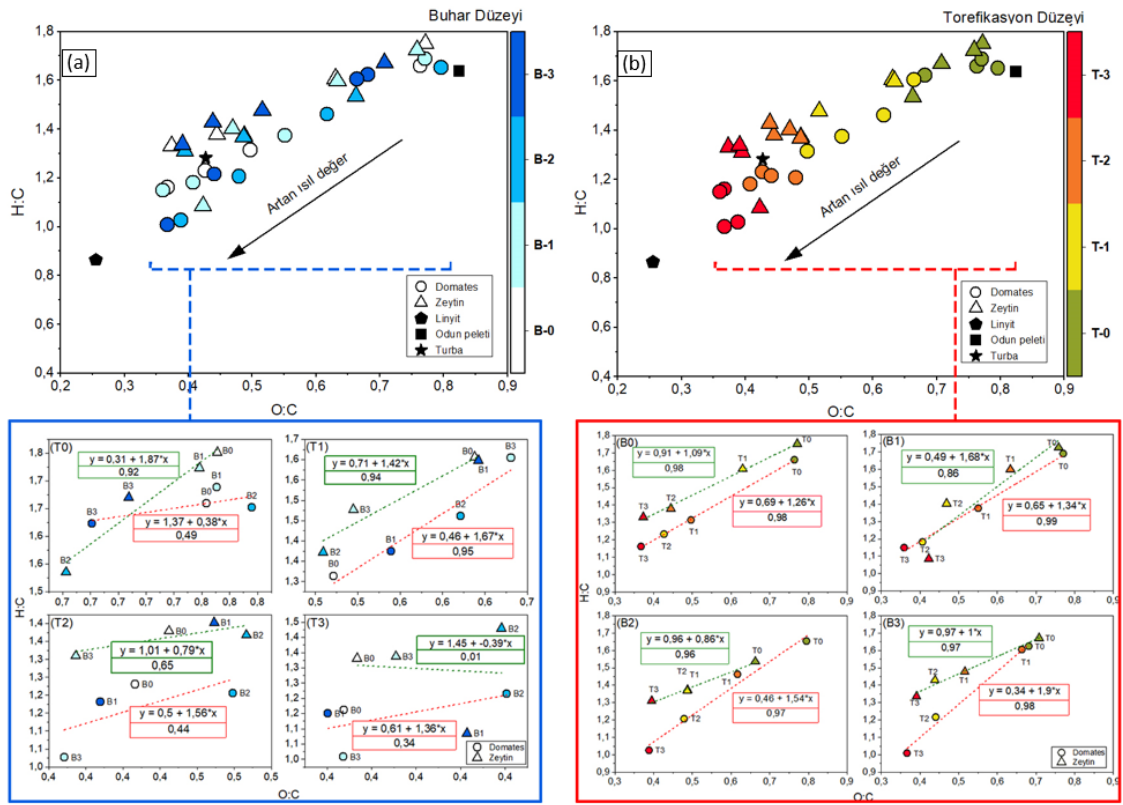
aralığındadır. Sıcak buhar etkinliğinin maksimize olduğu B2 düzeyine enerji verimleri %97.19-%90.31 düzeyine gerilemiştir. B3 düzeyinde elde edilen peletlerin enerji verimleri %98.62-%92.64 aralığındadır. B3 buhar düzeyinde düzensiz peletleme işleminin yaratmış olduğu heterojen özellik, peletlerin torefikasyon karakteristiklerine de yansiyarak torefikasyon verimliliklerinde sapmaya neden olmuştur. Kütle kayıpları incelendiğinde, artan buhar düzeylerine (B0, B1, B2 ve B3) göre artan torefikasyon sıcaklıklarında kütle kaybı aralıkları sırasıyla %6.75-%19.02, %6.77-%16.45, %9.71-%18.03 ve %9.56-%18.23 aralıklarında hesaplanmıştır. Buharsız peletlemede ve B1 düzeyindeki buharlı peletlemede torefikasyon sıcaklığının T1'den T2'ye yükselmesi iyileştirme faktörlerinde belirgin artışa sebep olurken, B2 ve B3 buhar düzeylerindeki artış oranında azalma gerçekleşmiştir. İyileştirme faktörleri B0, B1, B2 ve B3 buhar düzeylerinde torefikasyon sıcaklığına göre sırasıyla 1.05-%1.18, 1.04-1.14, 1.08-1.10 ve 1.09,1.13 aralıklarındadır.

Torefikasyon verimlilik parametreleriyle ilgili elde edilen sonuçlar literatürle benzerlik göstermiştir. Torefikasyon sürecinde yakıttaki nem içeriği ve diğer uçucu bileşiklerin uzaklaşması kütle kaybına sebep olmaktadır. Torefikasyon sırasında, biyokütle materyalinin kütlesi enerji içeriğinden daha fazla azalır, bu durum ürünün enerji yoğunluğunu arttırmaktadır. Yapılan çalışmalarda, torefikasyon sıcaklığının artışının biyokütledeki nem içeriği ve uçucu maddeleri ve yoğunlaşmayan (non-condensable) gazları uzaklaştırarak kütle kaybını arttırdığı bildirilmiştir (Asadullah vd. 2014; Chen vd. 2012). Çabuk (2019), ayçiçeği küspesinin torefiye edildiği çalışmada, torefikasyon sıcaklığının artmasıyla kütle ve enerji veriminin düştüğünü, ısı değerini ve enerji yoğunluğunun arttığını gözlemlemiştir. Mamvura vd. (2018), 200 °C, 250 °C ve 330 °C torefikasyon sıcaklıklarında enerji veriminin düştüğünü, enerji yoğunluğunun arttığını gözlemleyerek en iyi yakıt kalitesini 300 °C torefikasyon sıcaklığında elde etmiştir. Araştırmacılar, torefikasyon işleminde tepkime sırasında yüksek enerji içerikli hidrokarbonlar (CxHy) biyokütleden uzaklaştığını, bu durumun daha büyük kütle kaybına neden olmasının yanı sıra ısı değerinde artışa ve enerji veriminde düşüşe neden olduğunu bildirmişlerdir (Chen ve Kuo 2011; Li vd. 2016; Riaz vd. 2021).

Hemiselüloz, biyokütlenin torefikasyonu sırasında kütle kaybının yaşanmasındaki başlıca etkidir (Li vd. 2016). Zheng vd. (2015), torefikasyon sırasında yapısal değişim sırasının hemiselüloz>lignin> selüloz olduğunu bildirmiştir. Benzer bir görüş Chew ve Doshi (2011) tarafından da bildirilmiş olup, devolatizasyon ve dehidrasyon reaksiyonuna neden olan hemiselüloz içeriğinin torefikasyona karşı direnç gösterdiği yönündedir. Bu çalışmada pelet hammaddesi olarak kullanılan materyallerin lignoselülozik yapısı incelendiğinde, zeytin budama artıklarının hemiselüloz, lignin ve selüloz içeriklerinin sırasıyla %15.49, %22.13 ve %25.72, sera domates sapı artıklarının ise %11.58, %9.44 ve 35.81 olduğu görülmektedir (Çizelge 4.1). Termal bozunma önceliğine göre değerlendirildiğinde, zeytin budama artıklarının, domates sapı artıklarına göre yüksek hemiselüloz ve lignin içermesinin torefikasyona karşı daha dirençli oldukları sonucuna varılmıştır. Torefikasyon verimliliği sonuçlarında da belirtildiği üzere, tüm buhar düzeylerinde ve tüm torefikasyon sıcaklıklarında sera domates saplarının torefikasyon verimlilikleri zeytin budama artıklarına göre üstün özelliktedir. Biyokütlenin lignoselülozik yapısının torefikasyon verimliliğine etkisinin sunulduğu çalışmalarda, bu çalışmadakine benzer nitelikte sonuçlar elde edilmiştir.

Lignoselüozik yapının yanı sıra parçacık boyutu da torefikasyon verimliliğini etkileyen bir unsurdur. Hammadde parçacık boyut dağılımları (Şekil 4.1) ve peletlerin mikroskop altındaki görünüşleri (Şekil 4.2) incelendiğinde, zeytin budama artıklarının iri daneli partiküllere sahip olduğu görülmektedir. İri, odunsu partiküllerin toz formunda partiküllere göre yüzey alanlarının az oluşu, aynı koşullarda torefikasyon sonucunda toz partiküllerin daha etkin torefiye edilmesini sağlamıştır.

Biyokütlenin torefikasyonunda karbon, hidrojen ve oksijen elementlerinin Van Krevelen diyagramında oransal karşılaştırmaları yakıtın diğer bilinen yakıtlarla ısıl değer ve elementel içerik oranlarının kıyaslanmasına olanak sağlar. Şekil 4.16'de sera domates sapları ve zeytin budama artıklarının artan sıcak buharlı peletleme ve artan sıcaklıklarda torefikasyon sonucu elde edilen peletlerin Van Krevelen diyagramı üzerinde gösterimi yer almaktadır.



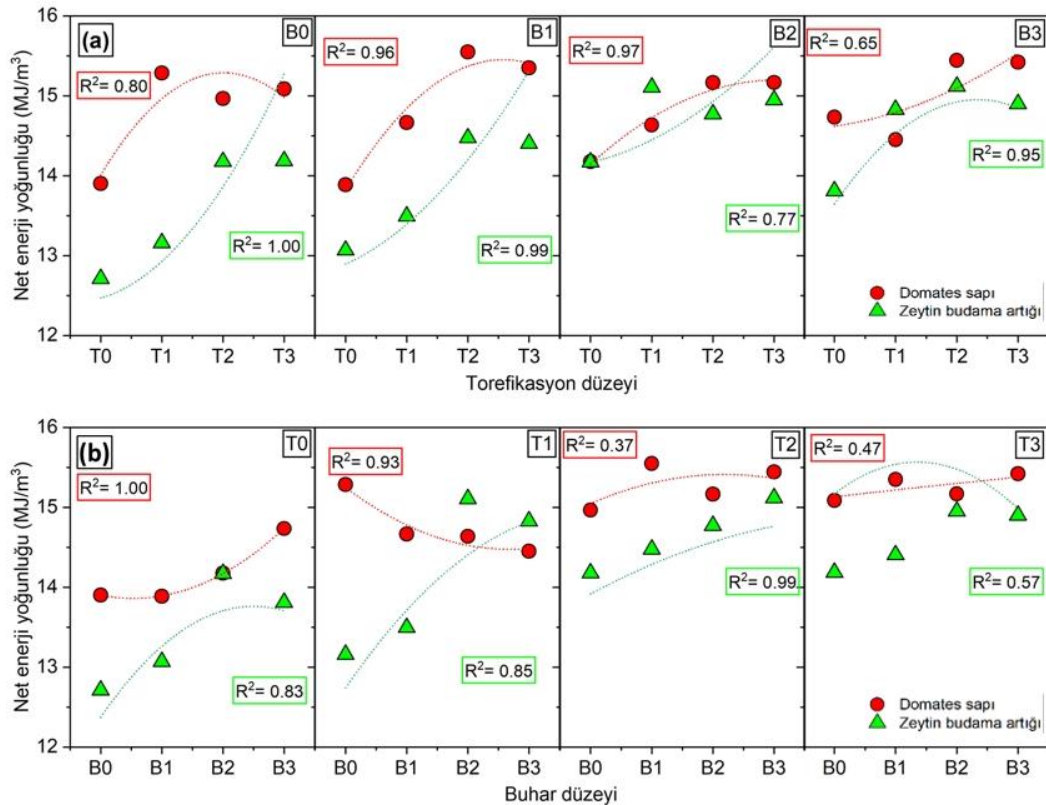
Şekil 4.16. Artan sıcak buhar düzeylerinde üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletlerinin **a)** artan buhar düzeylerine göre Van Krevelen Diyagramındaki konumu, **b)** artan torefikasyon düzeylerine göre Van Krevelen Diyagramındaki konumu

Şekil 4.16-a detayında belirtildiği üzere, artan buhar düzeylerinin atomik oranlarla ilişkisi T0 ve T1 torefikasyon düzeylerinde zeytin budama artıkları için sırasıyla $R^2=0.92$ ve $R^2=0.94$, sera domates sapı artıkları için $R^2=0.49$ ve $R^2=0.95$ düzeyindedir. Buhar düzeyinin atomik oranlara etkisi T2 düzeyinde düşüş göstererek zeytin budama artıkları için $R^2=0.65$, sera domates sapı artıkları için $R^2=0.44$ düzeyine gerilemiştir. En yüksek

tofeikasyon sıcaklığında (T3), buhar düzeyinin artışı ile atomik oranlar arasındaki ilişki zeytin budama artıkları için $R^2=0.01$, sera domates sapı artıkları için $R^2=0.34$ değerleri ile en düşük düzeydedir. Elde edilen verilere göre, buhar düzeyi artışının tofeikasyon sonucu değişen atomik oranlara, dolayısıyla ısıl değerlere etkide bulunduğu, tofeikasyon sıcaklığının 280 °C'yi aşması durumunda bu etkinin önemini yitirdiği sonucuna varılmıştır.

Aynı buhar düzeyinde tofeikasyon sıcaklığının atomik oranlarla ilişkisi Şekil 4.16-b detayında yer almaktadır. Buharsız pelet üretiminde, tofeikasyon düzeyi ile atomik oran arasında her iki hammadde için aynı değerde ($R^2=0.98$) kuvvetli bir ilişki mevcuttur. Buhar düzeyi artışında (B1) zeytin budama artıklarının atomik oranlarla ilişkisi yüksek düzeyden orta düzeye ($R^2=0.86$) düşmüş, sera domates sapı peletlerinde ise doğrusallığa yaklaşarak kuvvetli ilişki ($R^2=0.99$) bulunmuştur. Buhar düzeyinin artışında (B2 ve B3) tofeikasyon sıcaklığı artışı atomik oranlarda yüksek ilişki ($R^2= 0.96-0.98$) seyrini koruyarak doğrusallıkta bozulma meydana gelmemiştir. Buna göre tofeikasyon işleminin tüm buhar düzeylerinde, atomik oranlarda doğrusal bir seyire neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Peletlerin yığın formundaki enerji eşdeğini ifade eden Net Enerji Yoğunluğu değerlerinin artan buhar düzeyleri ve artan tofeikasyon sıcaklıklarına göre değişimi Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletlerinin Net Enerji Yoğunluklarının **a)** farklı buhar düzeyleri için tofeikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, **b)** farklı tofeikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi

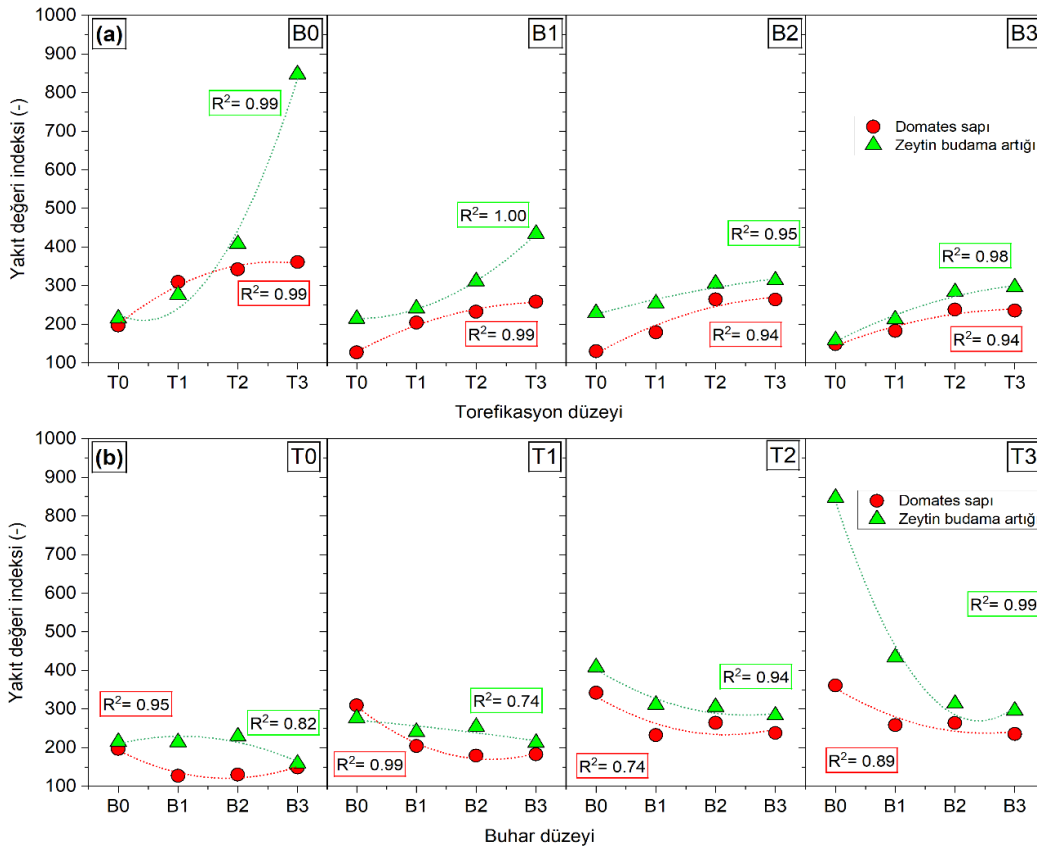
Şekil 4.17-a'da sera domates sapı peletlerinde, artan torefikasyon düzeyleri ile net enerji yoğunluğu arasında pozitif yönde polinomial bir ilişki tespit edilmiştir. Sera domates saplarında en yüksek net enerji yoğunlukları B0 buhar düzeyinde T1'de 15.29 MJ/m^3 , B1 buhar düzeyi T2'de 15.55 MJ/m^3 , B2 buhar düzeyinde T2 ve T3'de 15.17 MJ/m^3 ve B3 buhar düzeyinde T2'de 15.44 MJ/m^3 olarak hesaplanmıştır (EK-14).

Zeytin budama artıklarında en yüksek net enerji yoğunlukları B0 buhar düzeyinde T3'de 14.19 MJ/m^3 , B1 buhar düzeyi T2'de 14.40 MJ/m^3 , B2 buhar düzeyinde T3'de 14.95 MJ/m^3 ve B3 buhar düzeyinde T2'de 15.12 MJ/m^3 olarak hesaplanmıştır (EK-15).

Şekil 4.17-a'da, B0 ve B1 buhar düzeylerinde artan torefikasyon sıcaklığına göre net enerji yoğunlukları T3 düzeyine kadar doğrusal artış göstermiştir. Fakat T3 torefikasyon düzeyinde net enerji yoğunluğu değeri azalma eğilimine girmiştir. Artan torefikasyon düzeyine rağmen azalan net enerji yoğunluğunun nedeni, torefikasyon düzeyinin artışının neden olduğu ısı değerinde artış ve yığın yoğunluğundaki azalışın birbirini karşılayamamasıdır. T0, T1 ve T2 koşullarına kıyasla, ısı değerinde artış oranının yığın yoğunluğu değerindeki azalma oranından düşük olması, yığın formdaki enerji verimliliğini azaltmıştır. Zeytin budama artıklarında benzer bir durum B2 buhar düzeyine T2 torefikasyon düzeyi ve B3 buhar düzeyinde T3 torefikasyon düzeyi için de geçerlidir.

Zeytin budama artıkları ve sera domates sapı artıklarının ısı değerleri birbirine oldukça yakındır (EK-16 ve EK-17). Bu durumda net enerji yoğunluğundaki belirleyici faktör yığın yoğunluğu değerleri, yani peletlenebilirlik özellikleridir. Peletlerin yığın yoğunlukları ile ilgili Şekil 4.8-a'da yer aldığı ve önceki çalışmalarda da sunulduğu üzere, torefikasyon düzeyindeki artış peletlerde nem içeriği ve uçucu madde kaybına bağlı olarak kütlelerinde azalmaya sebep olmaktadır. Bu durum yığın yoğunluğu değerlerine de yansiyarak artan torefikasyon düzeyi pelet yığın yoğunluklarını düşürmüştür. Fakat uçucu madde ve nem içeriğindeki kayıplar birim kütledeki enerji içeriklerinde artışa neden olmuştur. Şekil 4.8-b'de buhar düzeylerine bağlı yığın yoğunluğu değişim incelendiğinde artan buhar düzeyinin daha yoğun peletler üretilmesine olanak sağladığı görülmektedir. Fakat artan buhar düzeyiyle daha yoğun peletlerin elde edilmesi, eşit torefikasyon koşullarında peletlerin torefikasyon verimliliklerini düşürmüştür (Şekil 4.15). Şekil 4.17'de sunulduğu üzere, zeytin budama artıklarının net enerji yoğunlukları hemen hemen tüm buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyi koşullarında sera domates sapı artıklarınıninkine göre düşük hesaplanmıştır. Peletlenmesi sera domates sapı artıklarına göre nispeten daha güç olan zeytin budama artıklarının B2 buhar düzeyinde daha verimli peletlendiği, dolayısıyla net enerji yoğunluğu açısından sera domates sapı artıklarıyla hemen hemen eşit düzeye geldiği görülmektedir. Fakat genel anlamda, öğütülmüş sera domates sapı artıklarının düzgün parçacık boyut dağılımı göstermesi ve düşük ortalama geometrik çap değerine sahip olması nedeniyle etkin peletleme davranışı göstermesine neden olmuştur. Böylelikle yüksek parça yoğunluğu, dolayısıyla yüksek yığın yoğunluğuna sahip olması, tüm koşullarda yığın formunda daha fazla enerji içeriğine sahip olmasıyla sonuçlanmıştır.

Yakıt değeri indeksi, peletlerin pratik kullanımında yığın formdaki ısı değeri, kül içeriği ve nem içeriğinin dikkate alınarak kıyaslanmasına olanak sağlar (Pegoretti Leite de Souza vd. 2021). Sera domates sapı ve zeytin budama artıklarının artan düzeylerde sıcak buhar uygulamasıyla peletlenmesi ve artan sıcaklıklarda torefiye edilmesiyle elde edilen peletlerin yakıt değeri indeksi değerlerinin değişimi Şekil 4.18'de yer almaktadır.



Şekil 4.18. Sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletlerinin yakıt değeri indeksi değerlerinin **a)** farklı buhar düzeyleri için torefikasyon sıcaklığına bağlı değişimi, **b)** farklı torefikasyon sıcaklıkları için buhar düzeylerine bağlı değişimi

Sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletlerinde, sabit buhar düzeylerinde yakıt değeri indeksi ile torefikasyon düzeyleri arasında yüksek oranda ($R^2= 0.94-1.00$) polinomiyal bir ilişki mevcuttur. Sera domates sapı artıkları için artan buhar düzeylerinde en yüksek yakıt değeri indeksleri buhar düzeyi-torefikasyon düzeyi faktörlerine göre $B0-T3= 360.91$, $B1-T3= 258.42$, $B2-T2= 264.16$, $B3-T2= 237.97$ olarak hesaplanmıştır (EK-14). Şekil 4.18-a'da, artan buhar düzeylerine göre yakıt değeri indeksi artış trendi incelendiğinde buhar düzeyi artışlarında yakıt değeri indeksinin düşüş eğiliminde olduğu görülmektedir. Torefikasyon işlemi ile biyokütlenin ısı değeri ve kül içeriğinde artış, nem içeriği ve yığın yoğunluğunda düşüş gerçekleşir. Eşitlik (3.22)'e göre, nem içeriği ve kül içeriğinin minimum düzeylerde olması yakıt değeri indeksini arttırırken, düşük ısı değeri ve düşük yığın yoğunluğu yakıt değeri indeksinde azalmaya neden olur (Purohit ve Nautiyal 1987). Bu bakımdan, buhar düzeyinin artışıyla yığın yoğunluğunda sağlanan artışa rağmen, torefikasyon işleminin yığın yoğunluğunda yarattığı düşüş artan buhar düzeylerinde yakıt değeri indeksinin azalmasına neden olmuştur. Şekil 4.18-b'de, sabit torefikasyon sıcaklıklarında, artan buhar düzeylerinin yakıt değeri indeksinde sebep olduğu düşüş belirgin bir şekilde görülmektedir. En yüksek yakıt değeri indeksleri, en yüksek torefikasyon düzeyi olan T3'de elde edilmiştir.

Şekil 4.18-b’de, torefikasyon uygulanmamış peletler (T0) ve EK-5 ile EK-10’daki çizelgelerde yer alan pelet nem içerikleri incelendiğinde, peletleme sırasında düşük enerji tüketimi, yüksek dayanıklılık ve yüksek üretim kapasitesi elde etme amacıyla uygulanan sıcak buhar işlemi, peletlerin nem içeriğinde gerçekleşen artış nedeniyle yakıt değer indekslerinde azalmaya neden olduğu anlaşılmaktadır.

Zeytin budama artıkları peletlerinde artan buhar düzeylerinde en yüksek yakıt değeri indeksleri buhar düzeyi-torefikasyon düzeyi faktörlerine göre B0-T3= 847.48, B1-T3= 434.09, B2-T3= 313.78, B3-T3= 295.67 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.18’de dikkat çeken nokta, buharsız (B0) üretilen ve T3 düzeyinde torefiye edilen zeytin budama artıkları peletlerinin en yüksek yakıt değeri indeksine sahip olmasıdır. Eşitlik (21) dikkate alındığında, B0-T3 peletlerinde yakıt değeri indeksini maksimize eden etkenler düşük nem içeriği (%1.03) ve yüksek ısıl değer (20.73 MJ/kg)’dir. Torefikasyon işlemi, sera domates artıkları peletlerine kıyasla zeytin budama artığı peletlerinden daha fazla nemin buharlaşmasına neden olmuştur (EK-5 ve EK-10). Bu durumun muhtemel sebebi sera domates sapı artıklarında bulunan naylon ip ve plastik klips kalıntılarıdır.

Sera domates sapı artıklarına kıyasla, zeytin budama artıklarında kül içeriğinin düşük, ısıl değer yüksek olması zeytin budama artıklarının yakıt değeri indeksinin sera domates saplarına göre daha üstün seviyede olmasına neden olmuştur.

4.6. Pelet Renk Parametreleri

Torefikasyon işlemi tüm peletlerde pelet renginin koyulaşmasına neden olmuştur. Torefikasyon sıcaklığının artış sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletlerinde, tüm buhar koşullarında renk koyulaşmasını arttırmıştır. Önceki çalışmalarda da belirtildiği üzere, herhangi bir fiziksel formdaki biyokütlenin değişken sıcaklıklarda torefiye edilmesi, biyokütlenin rengini koyulaştırmaktadır. Biyokütlenin şekli, çeşidi, homojenlik durumu ve torefikasyon değişkenlerine göre koyulaşma miktarı farklılık gösterebilmektedir. Genellikle, yüksek sıcaklıklarda (~300 °C) torefiye edilen biyokütle neredeyse tamamen siyah renge dönüşür. Değişken sıcaklık ve kalma sürelerinde torefiye edilen biyokütlenin rengindeki koyulaşma miktarı gözlemlenebilir düzeyde olmaktadır (Gaitán-Alvarez vd. 2017; Yoshida vd. 2015).

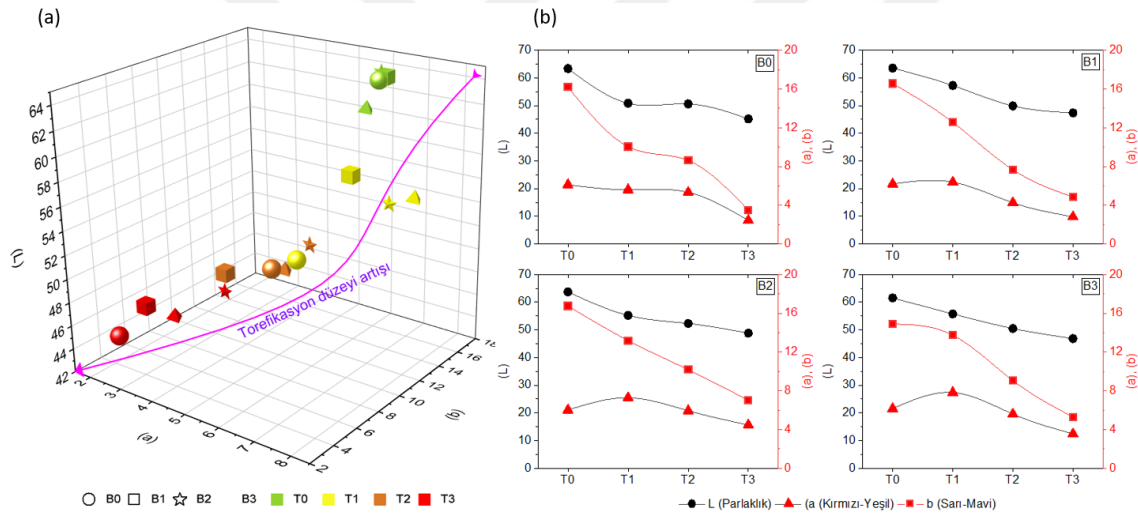
Öğütülerek ölçülen, CIELAB renk uzayında tanımlanan L (parlaklık), a (kırmızı-yeşil) ve b (sarı-mavi) renk skalalarında sayısallaştırılmasıyla sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıklarından üretilen peletlerin renk parametreleri ve ilgili renk parametrelerine karşılık gelen renk görselleri sırasıyla EK-18 ve EK-19’de yer almaktadır.

EK-18 ve EK-19 incelendiğinde, torefikasyon düzeyinin artışıyla peletlerin L, a ve b değerlerinde belirgin bir düşüş olduğu görülmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de pelet görünümü ile karşılaştırıldığında, torefikasyon düzeyi artışında pelet renklerinin gözle görülür biçimde koyulaştığı gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de yer alan peletler EK-18 ve EK-19’teki renk skalası birlikte incelenirse, buhar düzeyi artışında koyulaşma düzeyindeki farklılık gözlemlenebilmektedir. Buharsız üretilen peletler, buharla üretilen peletlere göre daha koyu renktedir. Bununla ilgili, mutlak ΔL değerleri

ele alındığında, buharsız (B0) üretilen peltelerde ΔL değerinin, buharla üretilen peletlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Pelet fiziksel özellikler, pelet kısa ve elementel analizler ile torefikasyon verimlilikleri başlıklarında da değinildiği üzere, buhar düzeyindeki artış peletlerin torefikasyon kabiliyetlerini kısıtlamıştır. Buharsız peletlerle kıyaslandığında, artan buhar düzeyinde yeteri kadar torefiye olamayan peletlerin koyulaşma miktarları da azalmıştır. Tüm renk parametrelerinin torefiye olmamış peletle renk farklılığını ifade eden ΔE değerinde bu durum daha açık biçimde görülmektedir. Özellikle T2 ve T3 torefikasyon düzeylerinde ΔE değerleri, buhar düzeyi arttıkça azalmaktadır.

Yapılan çalışmalarda, torefikasyon sonucu biyokütlenin renginde meydana gelen değişimin, biyokütlenin lignoselülozik yapısı, yüzey özellikleri, şeker molekülü içeriği ve Mailard reaksiyonu olduğu bildirilmiştir (Cen vd. 2020; Granados vd. 2017; Z. Huang vd. 2020; Serrano vd. 2011).

Sera domates sapı artıkları peletlerinin renk parametrelerinin 3B koordinat düzlemi üzerindeki konumu ile artan buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyine göre değişimi Şekil 4.19'de yer almaktadır.



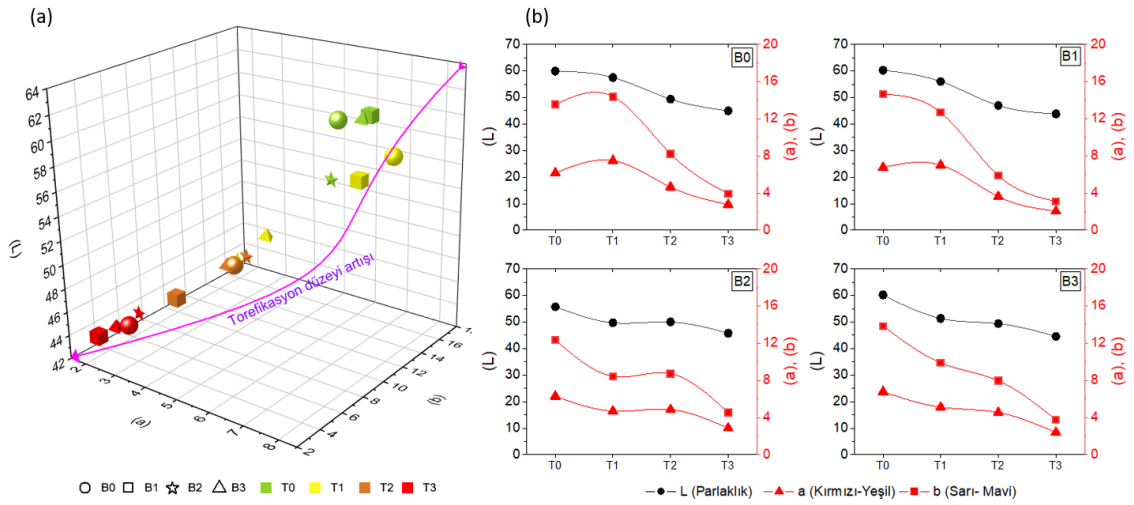
Şekil 4.19. Sera domates sapı artıkları peletlerinin L, a, b değerlerinin a) 3B koordinat düzlemindeki konumları, b) artan buhar düzeyi ve artan torefikasyon sıcaklığına göre değişimi

Sera domates sapı artıkları incelendiğinde, Şekil 4.19-a'da yer alan 3B koordinat sisteminde, torefiye edilmemiş peletlerin L, a ve b değerlerinin maksimum düzeyde olduğu görülmektedir. Artan torefikasyon sıcaklığının peletler üzerindeki koyulaştırma etkisi, L, a, b değerlerinde düşüşe neden olmuştur (Şekil 4.19-b). Sera domates sapı artıkları peletlerinin renk parametreleri ve yakıt parametreleri arasındaki regresyon eşitlikleri ile korelasyon katsayısı değerleri EK-20'da yer almaktadır.

EK-20 incelendiğinde, peletlerin kısa analiz (kül içeriği, uçucu madde, sabit karbon ve ısı değer) ve elementel içerikleriyle (C, H, N, O) renk parametrelerinden L (parlaklık)

değeri ile arasında orta düzey ve mükemmel düzey aralıklarında değişken ilişki ($R^2 = 0.73 - 1.00$) bulunmuştur. Kısa analiz ve elementel içeriklerle a (kırmızı-yeşil) değeri arasında ilişki düzeyi azalarak R^2 değerleri 0.38-0.93 aralığında hesaplanmıştır. Renk parametrelerinden b (sarı-mavi) ile kısa ve elementel analiz arasında en yüksek düzeyde ilişki mevcut olup R^2 değerleri 0.82 – 1.00 düzeylerinde değişmektedir. Torefikasyon düzeyiyle değişim gösteren kükürt içerikleriyle, L, a, b renk parametreleri arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır.

Zeytin budama artıkları peletlerinin renk parametrelerinin 3B koordinat düzlemi üzerindeki konumu ile artan buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyine göre değişimi Şekil 4.20’de yer almaktadır.

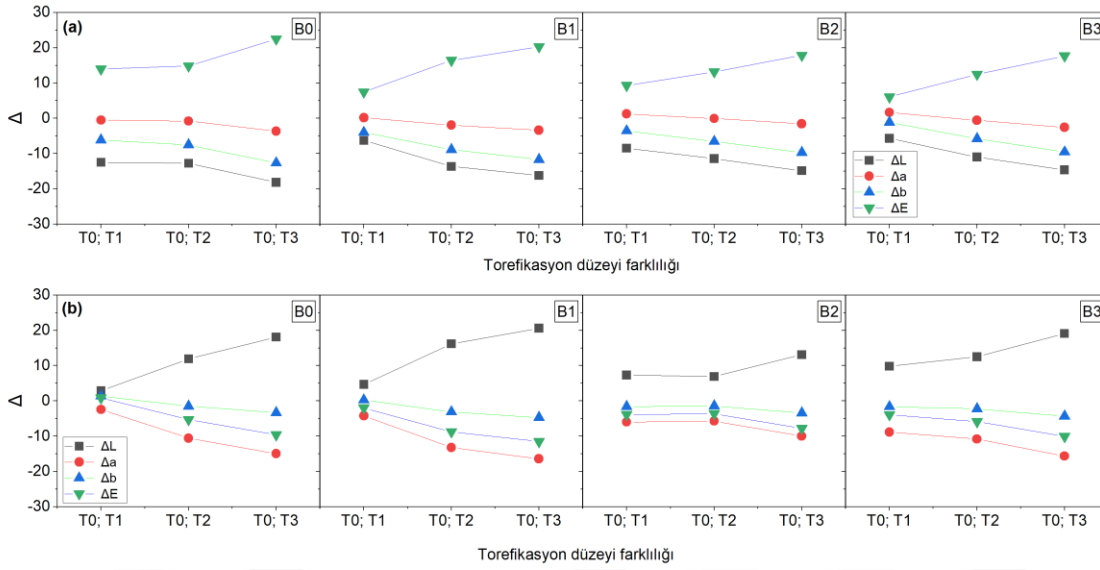


Şekil 4.20. Zeytin budama artıkları peletlerinin L, a, b değerlerinin **a)** 3B koordinat düzlemindeki konumları, **b)** artan buhar düzeyi ve artan torefikasyon sıcaklığına göre değişimi

Zeytin budama artıkları peletlerinin renk parametreleri ve yakıt parametreleri arasındaki regresyon eşitlikleri ile korelasyon katsayısı değerleri EK-21’de yer almaktadır.

EK-21 incelendiğinde, peletlerin kısa analiz (kül içeriği, uçucu madde, sabit karbon ve ısı değeri) ve elementel içerikleriyle (C, H, N, O) renk parametrelerinden L (parlaklık) değeri ile arasında orta düzey ve mükemmel düzey aralıklarında değişken ilişki ($R^2 = 0.62 - 1.00$) bulunmuştur. Kısa analiz ve elementel içeriklerle a (kırmızı-yeşil) değeri arasında ilişki düzeyi R^2 değerleri 0.66-0.92 aralığında hesaplanmıştır. Renk parametrelerinden b (sarı-mavi) ile kısa ve elementel analiz arasında orta düzey ve mükemmel düzeyde ilişki mevcut olup R^2 değerleri 0.66 – 1.00 düzeylerinde değişmektedir.

Torefiye edilmemiş (T0) peletler ile artan sıcaklıklarda torefiye edilmiş (T1, T2, T3) peletlerin ΔL , Δa , Δb ve ΔE değerlerinin buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyine göre değişimi Şekil 4.21’de yer almaktadır.



Şekil 4.21. Torefiye edilmemiş (T0) ve artan düzeyde torefiye edilmiş (T1, T2, T3) **a)** sera domates sapı artıkları ve **b)** zeytin budama artıkları peletlerin renk farklılık parametrelerinin torefikasyon düzeyi ve buhar düzeyine göre değişimi

Renk parametrelerinin, referans örnekten farklılığının sayısal olarak ifadesi anlamına gelen ΔL , Δa , Δb ve tüm renk parametrelerinin toplam farklılığını ifade eden ΔE değeri ile peletlerin torefikasyon verimlilikleri arasında mükemmel düzeyde ilişki ($R^2 = 0.73 - 1.00$) mevcuttur (EK-20, EK-21).

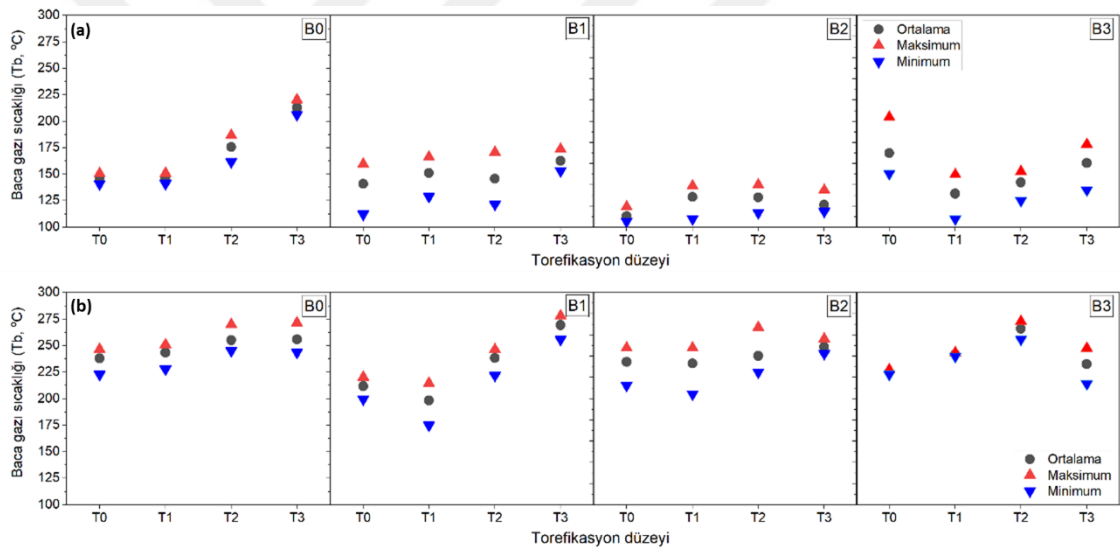
Torefikasyon verimliliğiyle ilgili eşitlikler (Kütle Kaybı (3.23), Kütle Verimi (3.24), Enerji Verimi (3.25), İyileştirme Faktörü (3.26)) ve renk parametresi farklılığıyla ilgili eşitlikler (Δa (3.11), Δb (3.12), ΔL (3.13), ΔE (3.14)) benzer bağıntılar üzerine kurulmuştur. Torefikasyon verimliliğiyle ilgili bağıntılar referans örnek ile torefiye edilmiş örneğin kütlesi ve/veya ısıl değerinin oransal karşılaştırması üzerine, renk parametreleri farklılığı bağıntıları ise referans örnekle torefiye edilmiş örneğin bireysel renk parametreleri farklılığı üzerinedir. Bu durumda, genel renk parametreleri farklılığı ΔE ile torefikasyon verimliliklerinin tahminlemesinin yapılabileceği ön görülmektedir.

Genel değerlendirmede, renk koyulaşmasının lineer doğrultuda olması ve pelet yakıt özelliklerinin de torefikasyon sıcaklığı artışına lineer tepki göstermesi, pelet rengiyle yakıt özellikleri arasında sayısal bir ilişki olasılığını kuvvetlendirmektedir. Torefikasyon işleminin peleti oluşturan elementlerde lineer doğrultuda değişime neden olması, görsel açıdan renk koyulaşmasında gözlemlenebilir farklılık yaratmasının yanında renk parametrelerinin sayılaştırılarak peletlerin kısmen elementel içeriklerinin ve torefikasyon verimliliklerinin yüksek güvenilirlikle tahmin edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.

4.7. Peletlerin Baca Gazı Emisyon Değerleri

Sera domates sapı peletleri ve zeytin budama artıkları peletlerinin yanma denemelerinde kaydedilen baca gazı sıcaklıkları, CO, NO_x ve SO₂ emisyonlarının karalı alev fazında yanma süreci boyunca artan buhar düzeyi ve torefikasyon sıcaklığına göre seyirleri EK-36, EK-37, EK-38, EK-39, EK-40, EK-41, EK-42 ve EK-43’da yer almaktadır. Genel anlamda, sera domates saplarının yüksek kükürt (S) ve azot (N) içeriği, peletler içerisinde yer alan ve iri partikül biçiminde dağılım gösteren naylon askı ipi ve plastik klips kalıntıları yanma seyrinde dalgalanmalara neden olmuştur. Buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyinin artışıyla pelet içerisinde eriyen plastik partiküller peletin nispeten homojen bir yapıya sahip olmasına, dolayısıyla yanma seyirlerine kararlılık kazandırmıştır. Zeytin budama artıkları peletlerinin düşük azot içeriği ve kükürt içermemesi emisyon değerlerinde azalmaya, plastik vb kalıntılar içermemesi ve düşük kül içeriği kararlı yanma performansı gözlemlenmiştir.

Sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerinin yakılması sırasında ortalama, minimum ve maksimum değerdeki baca gazı sıcaklıklarının artan buhar düzeyi ve artan torefikasyon düzeyine göre değişimi Şekil 4.22’de yer almaktadır.



Şekil 4.22. Peletlerinin yakılması sırasında ölçülen baca gazı sıcaklıklarının **a)** sera domates sapı peletleri, **b)** zeytin budama artığı peletlerinde maksimum, minimum ve ortalama değerleri

Yanma süreci boyunca ortalama baca gazı sıcaklıkları incelendiğinde, sera domates sapı peletleri ve zeytin budama artıkları peletlerinin baca gazı sıcaklıkları, torefikasyon düzeyi artışında artış göstermiştir. Torefikasyon işlemi, peletlerin ısıl değerlerinde artışa (EK-16, EK-17) ve nem içeriklerinde düşüşe neden olmuştur (EK-5, EK-10). Bu nedenle, aynı yanma koşullarında azalan nem içeriği ve artan ısıl değer yanma sırasında ısıl enerjinin artışına neden olarak baca gazı sıcaklığını arttırmıştır.

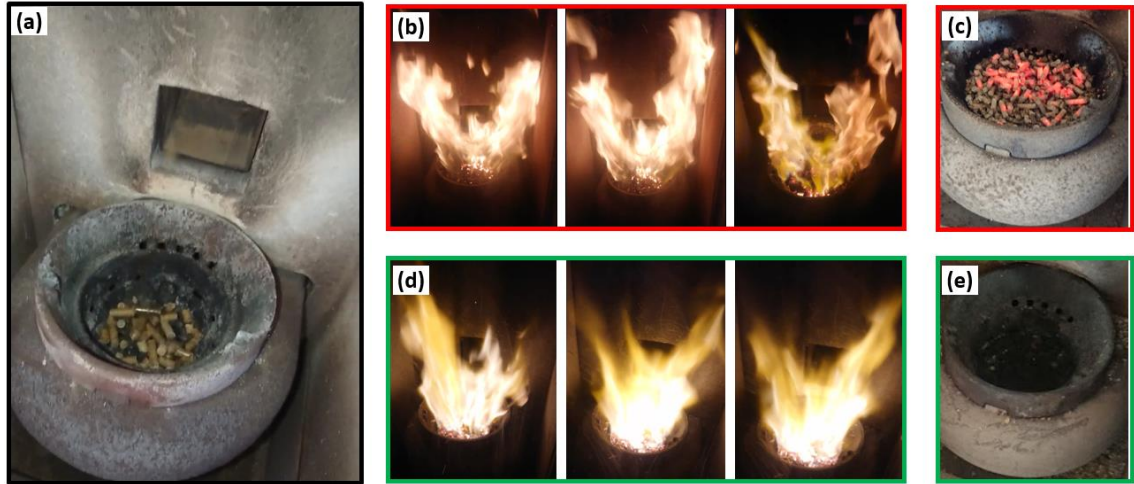
Sera domates sapı artıklarında en yüksek baca gazı sıcaklığı buharsız üretilen peletlerde ve T3 torefikasyon düzeyinde 213 °C, en düşük baca gazı sıcaklığı B2 buhar düzeyiyle üretilen ve torefiye edilmemiş (T0) peletlerde 110 °C olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.22-a'da, B1 buhar düzeyinde artan torefikasyon düzeyine göre baca gazı sıcaklığı artışı belirgin bir şekilde gözlemlenirken, B1 ve B2 buhar düzeyinde artan torefikasyon düzeyine göre baca gazı sıcaklığı artışı azalma seyrindedir. Artan buhar düzeyinin daha sıkışık formda ve yoğun pelet üretimine neden olması fiziksel stabilite ve depolanabilirlik özellikleri açısından avantajlı olsa da aynı yanma koşullarında yoğun peletlerin yanma sürekliliğini kısıtlamıştır. Diğer bir deyişle, daha yoğun peletlerin kararlı seyrinde yanması için besleme kapasitesinin azaltılarak peletlerin daha uzun süre alev maruz kalması veya kararlı alev fazında hava hızının arttırılarak yanma odasına daha fazla oksijenin girişi sağlanmalıdır. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki deneyimlerle benzerlik göstermekte olup, Brassard vd. (2014) hava hızında artış seçeneğini, Petrović Bećirović vd. (2015) besleme kapasitesinin düşürülmesi seçeneğini yanma verimini arttırmak için kullanılabileceğini önermişlerdir. B3 buhar düzeyinde üretilen sera domates sapı peletlerinde yüksek hammadde nemi, peletlemedeki kısmi düzensizlikler ve buhar uygulamasının sağladığı yüksek yoğunluk yanma sürekliliğine olumsuz etkide bulunarak baca gazı sıcaklıklarında düzensizliğe neden olmuştur.

Şekil 4.22-b'de yer alan zeytin budama artıkları peletlerinin baca gazı sıcaklarında, en yüksek değer B1 buhar düzeyi ve T3 torefikasyon düzeyinde 269 °C, en düşük değer B1 buhar düzeyi ve T1 torefikasyon düzeyinde 198 °C olarak ölçülmüştür. Genel anlamda zeytin budama artıklarının sahip olduğu yüksek uçucu madde içeriği yanma performansına olumlu yönde etkide bulunarak yüksek baca gazı sıcaklığına sebep olmuştur. Artan torefikasyon düzeyinin sağladığı ısı değer artışı ve nem içeriği düşüşü nedeniyle baca gazı sıcaklıklarında artış sağlamıştır. Buhar düzeyiyle nem içeriği artışına bağlı olarak B1 buhar düzeyinde torefiye edilmemiş peletlerde baca gazı sıcaklığı değerindeki düşüş belirgin bir şekilde gözlemlenirken, zeytin budama artıklarının peletlenmesinde B2 ve B3 buhar düzeylerinde buhar verimi kritik eşiğine ulaşması baca gazı sıcaklığı seyirlerinde belirgin farklılıklara neden olmamıştır.

Sera domates sapı peletlerinin ve zeytin budama artıkları peletlerinin baca gazı sıcaklığı değerleri sırasıyla 110-213 °C ve 198-269 °C aralığındadır. Şekil 4.13'de sunulduğu üzere, sera domates saplarının kül içeriği yüksek, uçucu madde içeriği düşük, zeytin budama artıklarının kül içeriği düşük, uçucu madde içeriği yüksektir. Sera domates saplarının düşük uçucu madde miktarı peletlerin tutuşmalarının gecikmesine neden olurken, yüksek kül içeriği ve erimiş naylon ip/plastik klips kalıntıları yanma odası deliklerinde tıkanmalara sebep olmuştur. Lamberg vd. (2013) ve Petrović Bećirović vd. (2015) artan baca gazı sıcaklıklarında yanma verimlerinin arttığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde Shen vd. (2015), baca gazı sıcaklığının yanma sıcaklığı göstergesi olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu görüşlerden ve denemelerde elde edilen sonuçlardan yola çıkarak sera domates sapı peletlerinin yanma verimlerinin zeytin budama artıkları peletlerinininkinden düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Buharsız pelet üretimi ve torefiye edilmemiş peletlerin yanma denemeleri sırasında kaydedilen video görüntülerinden rastgele seçilen alev formları ve yanma işlemi sonrasında kül kalıntıları Şekil 4.23'de yer almaktadır.



Şekil 4.23. Yanma denemelerine ilişkin **a)** yakma işlemi başlangıcında yanma odası, **b)** sera domates sapı peletlerinin alev formları ve **c)** kül kalıntıları, **d)** zeytin budama artığı peletlerinin alev formları ve **e)** kül kalıntıları

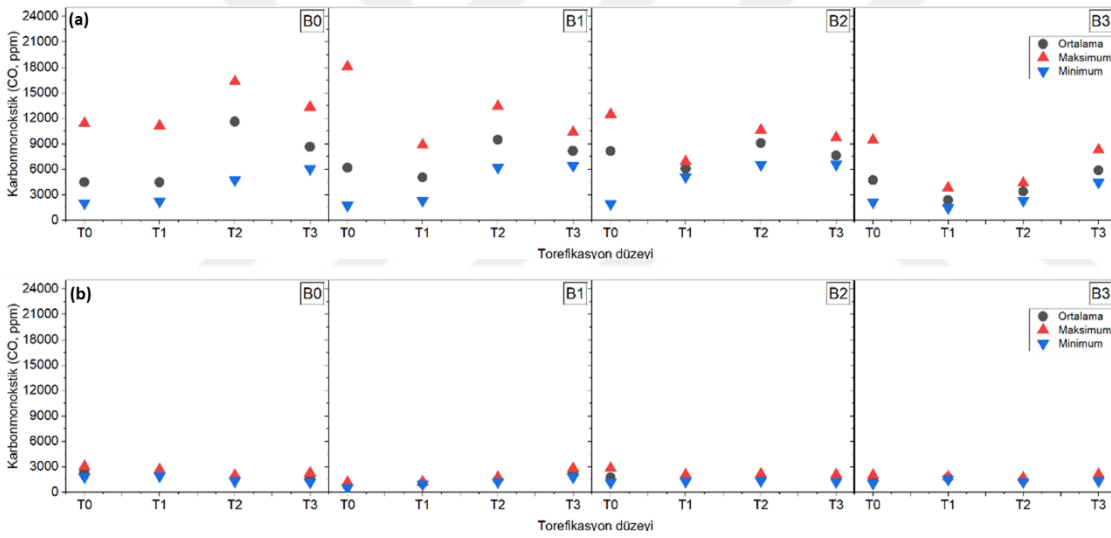
Şekil 4.23’de sunulduğu üzere, sera domates sapı artıkları peletlerinin yanma odasında tıkanmalara sebep olması ve tutuşmalarındaki gecikme yanma performansının yanında alev görünümüne de etki etmiştir. Normal koşullarda yanma odasından üflenen hava, peletlerin kül kalıntılarını kül tepsisine aktarmaktadır. Fakat kül içerisine karışmış erimiş plastik partiküller külün ağırlaşmasına ve hava ile taşınmasına engel oluşturmuştur (Şekil 4.23-c). Yanma işlemi boyunca kül ve erimiş plastiğin yanma odasında birikmesi ve halen pelet beslemesi yapılması dairesel yanma odasının orta bölümüne yeterli hava aktarılamamasına neden olmuştur. Böylece, yanma odasının orta bölümündeki hava kanallarındaki tıkanıklık alevin sağ ve sol bölümde daha yoğun yükselmesiyle sonuçlanmıştır. Bu durum, normal koşullarda homojen yayılması gereken alevin ters üçgen şeklinde boşluk oluşturmaya neden olmuştur (Şekil 4.23-b). Sera domates sapı peletlerinin yakılması sırasında, yanma odasındaki hava geçiş deliklerinde yaşanan tıkanma kararlı alev fazındaki alev formunu, yanma sürekliliğini, baca gazı sıcaklığını ve baca gazı emisyonu değerlerini olumsuz yönde etkilemiştir. Benzer bir deneyim Juszcak ve Lossy (2012) ve Liu vd. (2013) tarafından bildirilmiş olup, çeşitli tarımsal artıklardan üretilen peletlerin pelet sobasında yakılmasında yüksek kül içeriğinin yanma odasında hava sirkülasyonunun kısıtladığı, böylece yanma veriminin düşerek CO emisyonlarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Biyokütledeki külün içeriğinde potasyum, kalsiyum, sodyum, silisyum, fosfor, demir, magnezyum, klor ve sülfür elementleri bulunmaktadır (Thyrel vd. 2013).

Tarımsal artıkların yakılmasında orman ürünleri artıklarına nazaran düşük yanma verimi yüksek baca gazı emisyonu elde edilmektedir. Çünkü, orman ürünleri artıklarında genellikle silisyum ve potasyum içerikleri düşük, kalsiyum içeriği yüksek, tarımsal artıklarda ise silisyum ve potasyum içeriği yüksek kalsiyum içeriği düşüktür (Contreras-Trejo vd. 2022). Kül içeriği ve yabancı maddelerin neden olduğu düşük yanma performansının ısıl verime olan olumsuz etkilerinin yanında çevresel faktörler için de risk teşkil etmektedir. Düşük yanma sıcaklığı ve alev maruz kalma süresinin kısa olması yetersiz yanmaya neden olarak CO, CH₄ NMVOC (metanı olmayan uçucu organik bileşikler), PAH (polisiklik aromatik hidrokarbonlar), PM (partikül madde), NH₃

(amonyak) ve O₃ (ozon) bileşiklerinden oluşan emisyonların ortaya çıkmasına neden olur (Sjaak ve Koppejan, 2016). Ayrıca, yakma sistemlerinin yanma odasında biriken kül ve inorganik elementler cüruflaşmaya neden olarak yanma odasının korozyona uğramasına ve uzun vadede delinmesine neden olabilmektedir (He vd. 2022). Obernberger vd. (2006), yanma odasında kül ergimesi ve korozyonun temel sebebinin biyokütlerdeki kükürt içeriği olduğunu bildirmiştir.

Zeytin budama artıkları peletleri yüksek uçucu madde miktarı, düşük kül içerikleri ve plastik kalıntıya sahip olmamaları nedeniyle oldukça verimli ve kararlı yanma davranışı göstermişlerdir. Şekil 4.23-d’de yer alan alev formları incelendiğinde, yanma odasında tıkanmanın meydana gelmemesi hava akışının verimli bir biçimde alevi yükseltmesiyle sonuçlanmıştır. Yanma döngüsü içerisinde tamamen küle dönüşen peletler hava üfleme ile yanma odasını terk ederek kül tepesine aktarılmıştır. Böylece bir sonraki pelet besleme periyodu için temizlenen yanma odasında yanma süreci kararlı bir seyirde devamlılık sağlamıştır.

Peletlerin yanma süreci boyunca ölçülen CO emisyonlarının ortalama, maksimum ve minimum değerleri Şekil 4.24’da yer almaktadır.



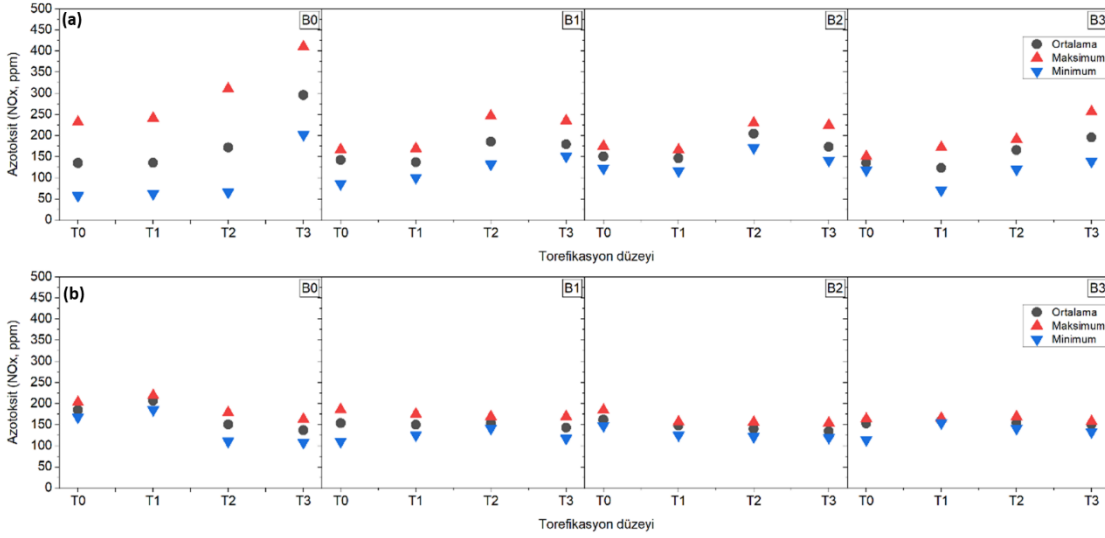
Şekil 4.24. Peletlerinin yakılması sırasında ölçülen karbonmonoksit (CO) emisyonlarının **a)** sera domates sapı peletleri, **b)** zeytin budama artığı peletlerinde maksimum, minimum ve ortalama değerleri

Sera domates sapı peletlerinin yakılması sırasında en düşük ve en yüksek CO konsantrasyonları sırasıyla B3-T1 peletlerinde 2363 ppm, B0-T2 peletlerinde 11616 ppm olarak ölçülmüştür. Artan torefikasyon düzeyiyle uçucu miktarının azalması, peletlerin tutuşmasında ve yanma sürekliliğinde gecikmeye neden olarak CO emisyonlarında artışa sebep olmuştur. Buhar düzeyine göre değerlendirilecek olursa, CO emisyonları artan buhar düzeyine göre azalma eğilimindedir. Literatürdeki yaygın görüşe göre, düşük yanma veriminin CO emisyonlarında artışa neden olduğu bildirilmiştir. CO emisyon artışının başlıca nedenleri yanma sırasında yetersiz hava girişi, uçucu maddenin düşüklüğünden kaynaklanan alev sürekliliğinin sekeye uğraması ve yanma odasındaki yetersiz ortam sıcaklığıdır (Brassard vd. 2014; Garcia-Maraver vd. 2014; Roy vd. 2013). EK-36, EK-37, EK-38 ve EK-39’de yer alan yanma süresince ölçülen CO emisyonu

seyirleri incelendiğinde, emisyonların oldukça geniş aralıkta dalgalanmalara sahip olduğu görülmektedir. Sera domates sapı peletlerinin yer yer iri veya küçük partiküllü plastik kalıntılarına sahip olması (EK-29, EK-30, EK-31), 180 saniye boyunca sabit yanma rejiminde ölçülen emisyonların buhar düzeyine göre farklılıkların tespit edilmesini güçleştirmiştir.

Zeytin budama artığı peletlerinin yakılması sırasında en düşük ve en yüksek CO konsantrasyonları sırasıyla B1-T0 petlerinde 764 ppm, B0-T0 peletlerinde 2353 ppm olarak hesaplanmıştır. Sera domates sapı artıklarıyla karşılaştırıldığında, zeytin budama artıklarının plastik/naylon ip gibi yabancı maddeler içermemesi yanma süresince emisyon seyirlerinin daha kararlı ilerlemesine neden olmuştur (EK-40, EK-41, EK-42, EK-43). Peletlerde yanma performansını belirleyen parametrelerden nem içerikleri incelendiğinde, buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyine göre sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıklarının nem içerikleri birbirine oldukça yakındır (EK-5, EK-10). Kül içerikleri ise zeytin budama artıklarında sera domates sapı artıklarına göre daha düşüktür (Şekil 4.13). Her iki hammadde için aynı buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyindeki peletlerin birbirine yakın nem içeriği ve hammadde bazında büyük farklılık göstermeyen kül içeriklerine sahip olması yanma performansı ve emisyon değerlerinde de benzerlik göstereceği öngörüsü oluşturmaktadır. Fakat aynı besleme periyotları ve hava üfleme hızında gerçekleştirilen yanma denemelerinde yanma performansına doğrudan etki eden etmen, sera domates sapı peletlerindeki yüksek kül içeriği ve plastik bazlı yabancı maddelerdir. Tüm buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyi faktörlerinde sera domates saplarının yakılması sırasında hava sirkülasyonu, kül ve erimiş plastik nedeniyle kısıtlandığından buhar düzeyine göre yanma performansının irdelenmesi güçleşmektedir. Peletlerin yakılması sırasında ortaya çıkan CO emisyonlarıyla ilgili, Huangfu vd. (2014) ve Juszcak ve Lossy, (2012) yüksek CO emisyonunun yetersiz hava akışı ve aşırı pelet beslemesi olduğunu bildirmişlerdir. Tarımsal artıklardan üretilen peletlerin yakılması sırasında CO emisyonu yüksekliği, tarımsal artıkların genellikle yüksek kül içeriği içermelerinden dolayı beklenen bir sonuçtur. Yapılan karşılaştırmalı bir çalışmada, (Jandačka vd. 2012) odun peletleriyle kıyaslandığında, buğday samanından üretilen peletlerin CO emisyonlarının 3.7 kat daha fazla çıktığını bildirmiştir. Y. Liu vd. (2023)'in çalışmasında, bölgesel tarımsal artıklardan elde edilen peletlerin kararlı yanma fazında CO emisyonlarında besleme yoğunluğuna ve yanma fazlarına göre dalgalanmalar tespit edilmiş olup CO emisyonları 100-2500 ppm düzeylerinde ölçülmüştür.

Peletlerin yakılması sırasında NO_x emisyonlarının ortalama, maksimum ve minimum değerleri Şekil 4.25'de yer almaktadır.



Şekil 4.25. Peletlerinin yakılması sırasında ölçülen azotoksit (NO_x) emisyonlarının **a)** sera domates sapı peletleri, **b)** zeytin budama artığı peletlerinde maksimum, minimum ve ortalama değerleri

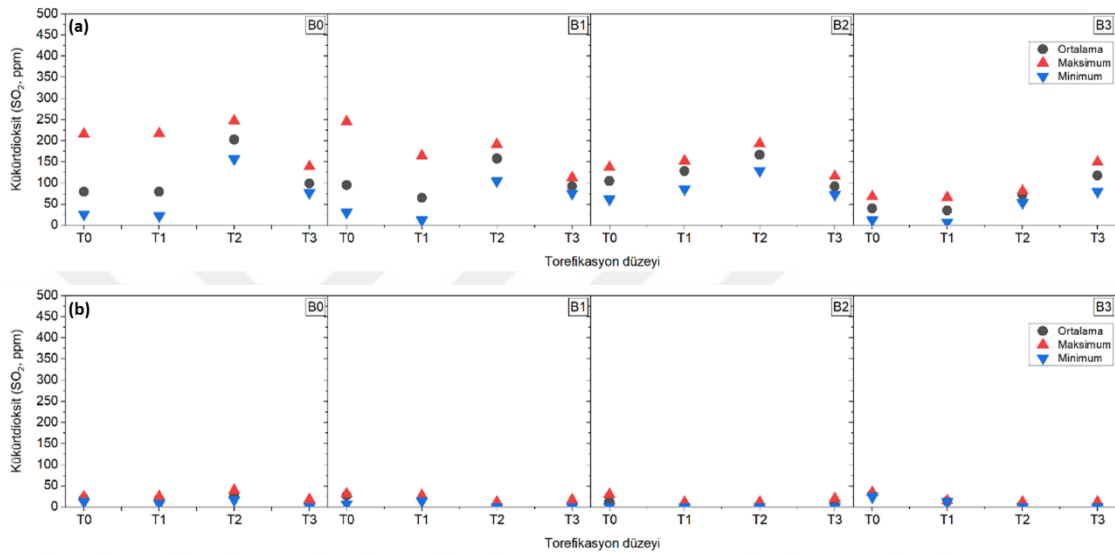
Biyokütlenin yakılması sırasında NO_x emisyonu üç farklı yol ile gerçekleşmektedir. Birincisi, 1300 °C üzerindeki sıcaklıkta atmosferdeki azotun form kazanması, ikincisi yakıtın doğrudan aleve maruz kalması yoluyla gerçekleşen anlık dönüşüm, üçüncüsü ise yakıtın elementel içeriğindeki azotun yanma sırasındaki dönüşümüdür (De Soete, 1991; Habib vd. 2008; Roy vd. 2011; Verma vd. 2011; Werther vd. 2000; Zhao vd. 2008).

Tüm peletlerde torefikasyon düzeyinin artışıyla elementel içeriklerdeki azot düzeyi artmıştır. Torefikasyon sırasında oksijensiz ortam azot gazıyla sağlanmıştır. Yapılan çalışmalarda da artan torefikasyon sıcaklığında, peletlerin azot içeriklerinde artış meydana geldiği, azot içeriğindeki artışın NO_x emisyonlarıyla paralellik gösterdiği bildirilmiştir (Abelha vd. 2019; Onsree ve Tippayawong, 2021; Wannapeera ve Worasuwannarak, 2012). Bu nedenle azot gazına artan sıcaklıklarda maruz kalan peletlerde azot gazı tutulumu gerçekleşerek elementel içeriklerindeki azot oranında artış meydana gelmiştir (EK-16, EK-17). Dolayısıyla, peletlerdeki azot yanma sırasında oksijenle birleşerek NO_x emisyonlarında artışa neden olmuştur. Sera domates sapı peletleri ve zeytin budama artıkları peletlerinin elementel içeriklerindeki minimum ve maksimum azot içerikleri sırasıyla, % 1.35-% 2.47 ve % 0.46-% 0.048 düzeyindedir. Şekil 4.25’de sera domates sapı peletlerinin ortalama NO_x emisyonları minimum ve maksimum 123-295 ppm aralığında değişmektedir. Zeytin budama artıkları peletlerinin ortalama NO_x emisyonlarının maksimum ve minimum değerleri 134-206 ppm düzeyindedir. Zeytin budama artıklarının minimum NO_x düzeyi sera domates sapı artıklarınıninkinden yüksektir. Bunun muhtemel nedeni, zeytin budama artıkları peletlerinde elde edilen verimli yanma seyrinin, elementel içerikteki azotun daha büyük oranda NO_x emisyonuna dönüştürmesidir. Buhar düzeyine göre NO_x emisyonları seyirlerinde ise anlamlı bir değişkenlik gözlemlenmemiştir.

Odun peletleriyle kıyaslandığında, tarımsal artıklardan üretilen peletlerin yanma sonucu NO_x emisyonlarının daha fazla olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Juszczak ve Lossy, 2012; Petrović Bećirović vd. 2015; Verma vd. 2011). Tarımsal

ürünler, yetiştiricilik sırasında inorganik gübre uygulamalarına ihtiyaç duymakta ve üretici tarafından belirli periyotlarda gübrelemeye tabi tutulmaktadır. En sık kullanılan inorganik gübrelerden olan azot içerikli gübreler, azot fiksasyonu ile organik forma dönüştürülerek bitkide protein, amino asit, nükleik asit ve klorofil gibi organik bileşiklerin yapısına girmektedir (Müftüoğlu ve Demirer, 1998). Diğer orman ürünleri artıklarına nazaran tarımsal artıklarda bulunan yüksek azot içeriği, biyokütle kaynağı olarak yakıt amacıyla kullanıldığında NO_x emisyonları meydana getirmesi kaçınılmazdır.

Peletlerin yakılması sırasında ortaya çıkan SO_2 emisyonlarının ortalama, maksimum ve minimum değerleri Şekil 4.26'de yer almaktadır.



Şekil 4.26. Peletlerinin yakılması sırasında ölçülen kükürt dioksit (SO_2) emisyonlarının a) sera domates sapı peletleri, b) zeytin budama artığı peletlerinde maksimum, minimum ve ortalama değerleri

SO_x emisyonları, yakıt içerisindeki kükürtün tamamen oksidize olması sonucu ortaya çıkmaktadır (Sjaak ve Koppejan, 2016). Sera domates sapı peletlerinde kükürt içerikleri %0.44-0.26 düzeylerinde değişmektedir. Artan buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyine göre kükürt içerikleri ve SO_2 emisyonu ortalama değerleri düzensiz dağılım göstermektedir. Zeytin budama artıkları peletlerinin elementel içeriklerinde ise kükürt elementine rastlanmamıştır. Şekil 4.26-b'ye göre, zeytin budama artıkları peletlerinin yakılması sırasında 4-30 ppm düzeylerinde SO_2 emisyonu ortaya çıkmıştır. Zeytin budama artıkları peletlerinde kükürt içermemesine rağmen ortaya çıkan göz ardı edilebilecek düzeyde olan SO_2 emisyonu, soba içerisindeki hava kanallarında, baca iç yüzeyinde ve yanma odası yüzeyine yapışan sera domates sapı peletlerinin cüruf kalıntıları sebebiyle oluşmuştur. Obernberger vd. (2006), SO_2 emisyonunun yakıt içerisinde bulunan kükürtün %0.2 düzeyini geçmesi durumunda yanma sırasında oluşacağını, bu değerden az kükürtün SO_2 emisyonu riski teşkil etmeyeceğini bildirmiştir.

Tarımsal artıklardan üretilen peletlerin otomatik beslemeli ev tipi bir pelet sobasıyla, eşit besleme ve hava üfleme koşullarında yakılması sonucunda, yüksek düzeyde CO, NO_x ve SO_2 emisyonları salınımı gerçekleşmiştir. Sera domates sapı peletlerinin kül içerikleri ve plastik kalıntıları içermesi yetersiz oksijen iletimi sonucunda

yüksek CO emisyonuna ve NO_x emisyonuna neden olmuştur. Biyokütlenin yakılması sırasında, NO_x ve SO₂ emisyonlarının atmosfere salınımı asit yağmurları oluşumunu tetiklemekte ve aynı zamanda insanlarda solunum problemlerine neden olabilmektedir (Carvalho vd. 2013; World Health Organization ve Organization, 2005). Bu olumsuzlukların giderilmesine yönelik, araştırmacılar, peletlerin elementel içeriğinden bağımsız olarak CO ve NO_x emisyonlarının düşürülmesi için besleme periyodu, hava hızı, yanma odası tasarımı gibi yakma parametrelerinin optimizasyonunu önermektedir (Nussbaumer, 2003; Obernberger vd. 2006). Fakat SO₂ ve SO₃ emisyonları biyokütlenin kükürt içerikleriyle ilişkilidir.

Seralarda yetiştirilen bitkilerin yetiştiricilik usullerine göre bakım ve hasat işlemlerinin kolaylaştırılması ve birim alandan en yüksek verim elde edilmesi amaçlandığından askı ipi, plastik klips ve metal çengel gibi aparatların kullanım zorunluluğu bulunmaktadır. Sera bitkisel artıkların biyokütle kaynağı olarak kullanımı amacıyla seradan toplama işlemi sırasında ve sonrasında metal çengellerin artıklardan tamamen ayrıştırılması oldukça kolaydır. Fakat askı ipleri ve klipsler yığın formundaki artıkların içerisinde birbirine geçik ve karmaşa içerisinde olduğundan biyokütle hammaddesi içerisinde yer alması kaçınılmazdır. Bu çalışmada hammadde olarak kullanılan sera bitkisel artıklarından domates sapları, toplama aşamasında insan iş gücü ile metal çengeller kolaylıkla temizlenmiştir. Fakat yığın formundaki artıklarda naylon askı ipleri ve plastik klipslerin tek tek ayıklanması mevcut koşullar altında insan iş gücü veya mekanik yöntemlerle mümkün olmamıştır. Bu bakımdan, hammadde içerisinde yer yer yoğunluk gösteren plastik kalıntılar peletlerin fiziksel özelliklerine olumsuz etkide bulunmamış olmasına rağmen, peletlerin yakma koşullarına, yanma verimlerine ve baca gazı emisyonlarına ciddi düzeyde olumsuz etkileri gözlemlenmiştir. Literatürde, tarımsal artıkların kül içeriklerinin fazla olması nedeniyle, düşük yanma verimi ve yüksek emisyon değerlerine sahip olmalarından dolayı genellikle endüstriyel ölçekli yakma sistemlerinde yakılması önerilmektedir. Fakat sera domates sapı artıklarının yoğun düzeyde plastik içermesi, endüstriyel ölçekte dahi tolere edilmesi güç olumsuzluklara sebep olma potansiyeline sahiptir. Yapılan çalışmalarda belirtildiği üzere, biyokütlenin yüksek kül içeriğine sahip olmasının iki önemli dezavantajı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, yakıtın yanma verimini düşürmesi, ikincisi ise külün yüksek sıcaklıkta yanma odasında meydana getirebileceği korozyon ve deformasyondur (Contreras-Trejo vd. 2022; He vd. 2022; Liu vd. 2023).

Otomatik beslemeli pelet sobalarında peletlerin yanma karakteristikleri ve emisyon seyirleri farklılık gösterebilmektedir. Pelet sobalarının tasarım parametreleri, yanma odası dizaynı, yakıt besleme oranı, besleme şekli, hava akış hızı, ateşleme süresi, yanma fazları, pelet hammaddesi ve peletlerin fiziksel yapısı gibi çok faktörlü etmenler yanma davranışlarında farklılığa neden olabilmektedir (Fournel vd. 2015; Y. Liu vd. 2023; Trojanowski vd. 2018; Wöhler vd. 2017). Tarımsal biyokütlenin değişken fizikokimyasal yapısı nedeniyle, üretilen peletlerin verimli yakılabilmesi ve mümkün olduğunca düşük emisyon salınımı elde edilebilmesi için pelet sobalarının tasarım ve yakma koşulları optimizasyonu çalışmalarının yapılması önerilmektedir (Y. Liu vd. 2023).

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tarımsal artıklardan sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıkları sıcak buhar yardımıyla peletlenerek torefikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Değişken düzeylerde sıcak buhar uygulamasının otsu yapıdaki sera domates sapı artıkları ve odunsu yapıdaki zeytin budama artıklarının peletlenme özelliklerine ve torefikasyon verimliliklerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen peletler otomatik beslemeli ev tipi bir pelet sobasında yakılarak baca gazı emisyonları ve yanma verimleri hesaplanmıştır.

Peletlemede sıcak buhar kullanımı her iki materyal için pelet üretim kapasitesinde artışa, özgül enerji tüketiminde düşüğe neden olmuştur. Sera domates sapı artıklarının buharsız peletlenmesi sırasında 70.04 kg/h olan üretim kapasitesi, %14-18 teorik buhar oranı değerine sahip üçüncü buhar düzeyinde 148.78 kg/h olarak elde edilmiştir. Özgül enerji tüketimi ise buharsız peletlemede 207.07 kWh/ton iken, üçüncü düzey buharlı peletlemede 114.07 kWh/ton değerine düşmüştür. Zeytin budama artıklarında ise buharsız peletlemede 73.01 kg/h olan üretim kapasitesi, üçüncü düzey buhar uygulaması ile 108.00 kg/h düzeyine artış göstermiştir. Özgül enerji tüketimi ise buharsız peletlemede 228.01 kWh/ton, en yüksek buhar düzeyinde 156.04 kWh/ton düzeyinde hesaplanmıştır.

Enerji tüketimi açısından en verimli buhar düzeyi (%14-18 teorik buhar oranı) dikkat alındığında, sera domates artıkları için buharsız ve buharlı üretimde kuru bazda özgül enerji tüketimi değerleri sırasıyla 255.57 kWh/ton ve 126.85 kWh/ton olarak hesaplanmıştır. Zeytin budama artıkları için ise %10-11 teorik buhar oranındaki kuru bazda özgül enerji tüketimleri buharsız ve buharlı üretim için sırasıyla 242.83 kWh/ton ve 166.99 kWh/ton'dur. Bu verilerden yola çıkarak, güncel sanayi elektriği ücretlendirmesi dikkate alındığında (4.63 TL/kWh), sera domates artıklarının buharsız pelet üretiminde ton başına maliyeti 1,183 TL iken en verimli buhar düzeyinde bu değer yaklaşık %50 düşüş göstererek 587.03 TL'ye düşmektedir. Zeytin budama artıklarında ise buharsız peletlemede 1,124.3 TL olan ton başına üretim maliyeti, en verimli buhar düzeyinde yaklaşık %30 düşüş göstererek 773.16 TL'ye gerilemiştir.

Artan buhar düzeylerinde peletleme işlemi üretim kapasitesi açısından sera domates sapı ve zeytin budama artıklarının peletlenmesinde doğrusal bir artışa neden olmuştur. Fakat öğütülmüş zeytin budama artıklarının odunsu, sert ve iri partiküllü yapısı peletleme sırasında sürtünmenin artmasına, peletleme ünitesinin fazla enerji tüketmesiyle sonuçlanmıştır. Ayrıca, sera domates sapı artıklarında özgül enerji tüketimi doğrusal oranda artarken, zeytin budama artıklarının peletlenmesinde üçüncü buhar düzeyi peletlemede düzensizliklere neden olarak artış göstermiştir. Biyokütlenin temel sıkışma karakteristiğini belirleyen lignin içerikleri incelendiğinde sera domates sapları ve zeytin budama artıklarının lignin içerikleri sırasıyla %9.14 ve %22.13'tür. Lignin içeriği dikkate alındığında, çalışmada elde edilen sonuçlardan farklı olarak, zeytin budama artıklarının daha verimli sıkışma karakteristiği göstereceği, dolayısıyla yüksek üretim kapasitesi ve düşük enerji tüketimi beklentisi oluşmaktadır. Fakat peletlenecek biyokütlenin parçacık boyut dağılımı ve partiküllerin fiziksel yapısı bu görüşün aksine sonuçlar doğurmuştur. Bu bakımdan, biyokütlenin lignoselülozik bileşenleri sıkışma karakteristiklerini belirleyen unsurlar olsa da hammaddenin otsu/odunsu yapısı ve partikül fiziksel özellikleri sıcak buharın etkinliğinin tanımlanmasında temel parametreler olduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçlara göre, otsu yapıdaki biyokütlenin sıcak buhar yardımıyla verimli bir biçimde peletlenebileceği, odunsu yapıdaki biyokütlenin ise

peletleme verimliliğinin artırılması için 4 mm'den küçük elek çapında öğütülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Sera domates sapı artıklarının otsu yapıda olması ve parçacık boyutlarının zeytin budama artıklarına göre daha küçük olması fiziksel açıdan daha stabil peletlerin üretilmesine olanak sağlamıştır. Öğütülmüş sera domates sapı artıkları, artan buhar düzeyiyle daha etkin sıkışma davranışı göstererek buharsız peletlemede 1353 kg/m^3 olan parça yoğunluğu en yüksek buhar düzeyinde 1393 kg/m^3 düzeyine ulaşmıştır. Benzer şekilde verimli sıkışma davranışı pelet yığın yoğunluklarında da etkisini göstererek buharsız 812 kg/m^3 olan yığın yoğunluğu en yüksek buhar düzeyinde 833 kg/m^3 'e yükselmiştir. Peletlemede sıcak buhar kullanımı, zeytin budama artıkları peletlerinin sıkışma karakteristiklerini iyileştirmiştir. Fakat odunsu, sert ve iri partiküllü hammaddeye sahip olması nedeniyle parça yoğunluğu ve yığın yoğunluğu açısından sera domates sapı peletlerine göre düşük değerlere sahiptirler. Buharsız ve en yüksek buhar düzeyiyle üretilen zeytin budama artıkları peletlerinin yığın yoğunluğu ve parça yoğunluğu değerleri sırasıyla, $725\text{-}758 \text{ kg/m}^3$ ve $1237\text{-}1265 \text{ kg/m}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Sıcak buhar kullanımı ve sıcak buhar düzeyindeki artış, peletlerin mekanik dayanıklılık indekslerinin artmasına neden olmuştur. Buharsız ve en yüksek düzey buharlı peletlemede, sera domates sapı artıkları ve zeytin budama artıklarının mekanik dayanıklılık indeksleri sırasıyla %97.57-%99.04 ve %96.23-%97.86 olarak hesaplanmıştır. Zeytin budama artıklarının pelet formlarında dahi peletlerin yüzeyinde odunsu partiküller görünür biçimde yer almaktadır. Mekanik dayanıklılık ve bası dayanımı testlerinde peletlerde meydana gelen çatlama, kırılma ve ufalanmalar, odunsu partiküllerin neden olduğu zayıf bağ noktalarından gerçekleşmiştir. Torefikasyon işlemi ile sera domates sapı peletleri ve zeytin budama artıkları peletlerinin mekanik dayanıklılık ve basınç dirençlerinde düşüş meydana gelmiştir. En fazla düşüş miktarı buharsız üretilen peletlerde ve en yüksek torefikasyon sıcaklıklarında gerçekleşmiş olup buharsız üretilen ve torefiye edilmemiş sera domates sapı artıkları peletlerinin mekanik dayanıklılık indeksleri %97.57 iken, $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de torefiye edilmiş peletlerde bu değer %95.47'ye gerilemiştir. Zeytin budama artıkları peletlerinde ise buharsız, işlem görmemiş peletler ve $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de torefiye edilen peletlerin mekanik dayanıklılık indeksleri sırasıyla %96.23 ve %94.86 olarak hesaplanmıştır. Peletlemede buhar düzeyinin artışı, peletlerin yoğunluğuyla beraber torefikasyon işleminin neden olduğu fiziksel deformasyon yatkinliğini azaltmıştır.

Torefikasyon işlemi ile işlem görmemiş sera domates sapı peletlerinin üst ısı değerleri $280 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık ve ikinci buhar düzeyinde en yüksek artış oranına sahip olup, %19.93 artış göstererek 16.91 MJ/kg 'dan 20.29 MJ/kg 'a yükselmiştir. Zeytin budama artıklarında ise torefikasyon işlemiyle en yüksek ısı değer artışı buharsız peletleme gözlemlenmiştir. İşlem görmemiş zeytin budama artıkları peletlerinin 17.52 MJ/kg olan üst ısı değeri %18.34 artışla 20.73 MJ/kg 'a ulaşmıştır. Artan sıcak buhar düzeylerinde üretilen peletler, sıcak buhar düzeyinin artışıyla yüksek yoğunluklu forma sahip olmuştur. Yüksek yoğunluk ise peletlerin torefikasyon kabiliyetlerini azaltmıştır. Sıcak buharla pelet üretimi, üretim kapasitesi, enerji tüketimi ve pelet fiziksel özellikleri açısından avantajlı olsa da torefikasyon verimliliği azalmıştır. Sıcak buharla üretilmiş yüksek yoğunluklu peletlerin torefikasyon verimliliğinin artırılması için reaksiyon sıcaklığı ve/veya reaksiyon süresinin artırılması önerilir. Literatürde de belirtildiği üzere,

biyokütlenin torefikasyon yeteneği fizikokimyasal açıdan bitkinin lignoselülozik içeriğine bağlıdır. Torefikasyon sırasında biyokütlenin termal bozunması hemiselüloz>lignin>selüloz biçiminde sıralanmaktadır. Bu bakımdan, zeytin budama artıklarının yüksek selüloz ve lignin içeriğine sahip olması torefikasyon verimliliğinin sera domates sapı peletlerinden düşük çıkmasıyla sonuçlanmıştır.

Biyokütle peletlerinin ısı değer, kül içeriği, yığın yoğunluğu ve nem içeriği gibi kalite göstergelerinin bireysel olarak değerlendirilmesi yerine, peletlerin gerçek koşullardaki kullanım etkinliğinin ifade edilmesinde “yakıt değeri indeksi”, pelet kalitesini daha geniş kapsamda tanımlayan bir göstergedir. Yakıt değeri indeksi açısından değerlendirildiğinde, buharsız pelet üretiminde yüksek torefikasyon sıcaklığı yakıt değeri indeksini arttırmıştır. Sıcak buharlı peletlemede yakıt değeri indeksini maksimize etmek için torefikasyon sıcaklığının artırılması önerilir.

Peletlerin fiziksel özellikleri ve yakıt özellikleri, tarımsal artıklardan üretilmiş ve ısı işlem görmüş peletler için belirlenmiş olan ISO/TS 17225-8 standardına göre değerlendirilmiştir (EK-11). Bu değerlendirmeye göre, sera domates artıkları ve zeytin budama artıkları peletlerinin tümü, çap ($\varnothing=6 \text{ mm}\pm 1$), boy ($3.5 \text{ mm} < B \leq 40 \text{ mm}$), nem içeriği ($N \leq \%10$) ve yığın yoğunluğu ($YY \geq 600 \text{ kg/m}^3$) bakımından standart değerlere sahip olmasına karşın, kül içeriği bakımından standart değeri ($K \leq \%5.0$) karşılamamaktadır. Özellikle buharsız ve birinci düzey buharla üretilen peletlerde, artan torefikasyon sıcaklığı, mekanik dayanıklılık indeksini düşürerek peletlerin standard dışı ($MD \geq \%97.5$) kalmasına neden olmuştur. Tüm peletlerde, torefiye edilmemiş peletlerin alt ısı değerleri standart değerin ($LHV \geq 18 \text{ MJ/kg}$) altında yer alırken, 250 ve 280 °C’deki torefikasyon sıcaklıklarında standart değeri sağlanmıştır. Sera domates sapı peletlerinin azot ve kükürt içerikleri standartta yer alan minimum değerlerin ($N \leq \%1.5$, $S \leq \%0.1$) üzerindeyken, zeytin budama artıkları peletleri azot ve kükürt açısından standart değeri karşılamaktadır.

Torefikasyon işlemi peletlerde gözle görülür biçimde renk koyulaşmasına neden olmuştur. Torefikasyon işlemi ile peletlerin kimyasal yapısındaki değişim ve renk göstergelerindeki değişim miktarı paralellik göstermektedir. Peletlerin kısa analizleri ve elementel içerikleriyle peletlerin L, a ve b değerleri arasında $R^2=0.67-0.98$ aralığında değişen oranlarda doğrusal yönde ilişki bulunmaktadır. Peletlerin artan torefikasyon sıcaklıklarında koyulaşmasıyla, renk parametrelerinden L (parlaklık) değerleri koyulaşma miktarında en belirgin göstergedir. L değerini takiben, a (kırmızı-yeşil) ve b (sarı-mavi) skalasındaki göstergeler artan torefikasyon sıcaklığıyla azalma göstermiştir. Torefikasyon edilmemiş peletler ile artan sıcaklıklarda torefikasyon edilmiş peletlerin kütlelerindeki ve enerji içeriklerindeki değişimin kıyaslamasındaki kütle kaybı, kütle verimi, enerji verimi ve iyileştirme faktörü göstergeleriyle renk parametreleri farklılıkları (ΔL , Δa , Δb) ve toplam renk farklılığı (ΔE) değerleri arasında $R^2=0.54-0.98$ düzeylerinde doğrusal ilişki bulunmaktadır. Bu göstergelerden yola çıkarak, peletlerin bireysel renk parametreleri ve toplam renk farklılığı değerleri kullanılarak, torefikasyon edilen peletlerde torefikasyon verimliliği, elementel içerik ve kısa analizlerin yüksek güvenilirlikle tahminlenebileceği sonucuna varılmıştır.

Peletlerin otomatik beslemeli bir pelet sobasında yakılması sırasında en düşük ve en yüksek baca gazı sıcaklıkları, sera domates sapı peletlerinde ortalama 110 °C ve 213 °C, zeytin budama artıklarında ortalama 198 °C ve 269 °C düzeylerinde

ölçülmüştür. Baca gazı sıcaklığı, peletlerin yanma verimleriyle doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, zeytin budama artıklarının sera domates artıklarına göre daha fazla uçucu madde içermesi, zeytin budama artıklarının tutuşma ve yanma sürekliliğinde üstünlük sağlamasına sebep olmuştur. Bu nedenle zeytin budama artıkları peletlerinin yanma verimlerinin sera domates sapı peletlerinininkine göre yüksek olduğu söylenebilir. Artan torefikasyon sıcaklığı peletlerin baca gazı sıcaklıklarında artışa neden olmuştur. Buhar düzeyinin torefikasyon verimliliğinde düşüşe neden olması peletlerin yakılması sırasında yanma verimliliğini düşürmüştür. Peletlerin otomatik beslemeli pelet sobasında yakılması sırasında alev yüksekliği ve alev sürekliliği, pelet yakıtının ısı değeri ve kül içeriğine bağlı olduğu kadar pelet besleme periyodu, hafa üfleme hızı ve pelet uzunluğu homojenitesine de bağlıdır.

Aynı yakma koşullarında yakılan sera domates sapı ve zeytin budama artıkları peletlerinde, artan torefikasyon sıcaklığı peletlerin elementel içeriklerine doğrudan etki ettiğinden artan azot içeriği NO_x emisyonlarını arttırmıştır. Periyodik besleme sırasında henüz yanma işlemini tamamlayamayan peletler üzerine yeni peletlerin dökülmesi, yanma için gerekli olan hava sirkülasyonunu sınırlandırdığından yüksek CO emisyonlarıyla karşılaşmıştır. Sera domates sapı peletlerinde CO emisyonlarının en düşük ve en yüksek değerleri sırasıyla 2363 ppm ve 11616 ppm düzeyindedir. Zeytin budama artıkları peletlerinin yakılması sırasında CO emisyonları en düşük ve en yüksek değerleri 764 ppm – 2353 ppm düzeylerinde hesaplanmıştır. NO_x emisyonlarının en düşük ve en yüksek değerleri sera domates sapı peletlerinde 123 ppm ve 296 ppm düzeylerinde değişirken, zeytin budama artıkları peletlerinde 134 ppm ve 206 ppm aralığındadır. Bununla beraber, sera domates saplarının yüksek kükürt içeriği SO_2 emisyonlarına neden olmuştur. Sera domates saplarında yer alan naylon ip ve plastik klips kalıntıları, pelet sobası yanma odasında kül ile birlikte cüruflaşmaya neden olarak yanma odasında kül katmanı oluşturmuş ve yanma için gerekli olan hava sirkülasyonunu kısıtlamıştır. Bu durum, yanma sırasında oksijen yetersizliğine sebep olarak CO emisyonlarının yüksek seyirde ilerlemesine neden olmuştur. Zeytin budama artıklarının kükürt elementi içermemesi ve herhangi yabancı madde partiküllerine sahip olmaması, sera domates sapı peletlerine kıyasla oldukça verimli yanma davranışı göstermiştir. Yanma verimliliğinin artışıyla CO emisyonları sera domates sapı peletlerine göre düşük seviyede seyretmiştir. Literatürde, tarımsal kökenli biyokütlenin yakılması sırasında yüksek kül içeriğinden kaynaklanan düşük yanma verimi, dolayısıyla yüksek CO emisyonu ve gübreleme uygulamalarından kaynaklanan NO_x ve SO_2 emisyon salınımının olumsuz etkilerinden bahsedilmektedir. Fakat otomatik beslemeli pelet sobalarında yanma performansını, dolayısıyla emisyon salınımını etkileyen önemli faktörler biyokütle özelliklerinin yanında, yakıt besleme periyodu, hava hızı ve yanma odası yapısal özellikleridir.

Tarımsal artıkların pelet hammaddesi olarak kullanılabilir potansiyele sahip olması, pelet sobalarında tarımsal peletlerin yanma parametrelerinin optimizasyonu gereğini doğurmaktadır. Yüksek kül içeriğinin yanma performansına olan olumsuz etkileri, yanma odasının yapısal özelliklerinin değiştirilmesi, harici hava üfleme kanallarının yakma sistemine dahil edilmesi gibi çözümlerle giderilebilir. Çalışmada kullanılan pelet sobasında da yakıt besleme işlemi yukarıdan dökme suretiyle gerçekleştirilmektedir. Bu durum, düşük yanma özelliklerine sahip olan peletlerde alev söndürme riski, is oluşturma suretiyle emisyonlarda pik noktalarının oluşması ve aşırı kül birikimi nedeniyle

yanma odası hava deliklerinde tıkanmalara neden olmaktadır. Bu nedenle, tarımsal artıklardan üretilen peletlerin yakılması sırasında yatay beslemeli yakıt iletim sistemlerinin kullanılması külün periyodik olarak yanma odasından boşaltılmasına olanak sağlayacak ve cüruflaşma riski en aza indirilecektir.



6. KAYNAKLAR

- Abedi, A., Dalai, A. K. 2017. Study on the quality of oat hull fuel pellets using bio-additives. *Biomass and Bioenergy*, 106, 166-175.
- Abelha, P., Mourão Vilela, C., Nanou, P., Carbo, M., Janssen, A., & Leiser, S. (2019). Combustion improvements of upgraded biomass by washing and torrefaction. *Fuel*, 253, 1018–1033.
- Adapa, P. K., Tabil, L. G., Schoenau, G. J. 2013. Factors affecting the quality of biomass pellet for biofuel and energy analysis of pelleting process. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6(2), 1-12.
- Adapa, P., Tabil, L., Schoenau, G., Opoku, A. 2010. Pelleting characteristics of selected biomass with and without steam explosion pretreatment. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(3), 62-79.
- Adrian, G. 2021. Key World Energy Statistics 2021, 1-82.
- Agar, D. A., Rudolfsson, M., Kalén, G., Campargue, M., Da Silva Perez, D., Larsson, S. H. 2018. A systematic study of ring-die pellet production from forest and agricultural biomass. *Fuel Processing Technology*, 180(June), 47-55.
- Alarcon, M., Santos, C., Cevallos, M., Eyzaguirre, R., Ponce, S. 2017. Study of the Mechanical and Energetic Properties of Pellets Produce from Agricultural Biomass of Quinoa, Beans, Oat, Cattail and Wheat. *Waste and Biomass Valorization*, 8(8), 2881-2888.
- Alex Marvin, W. Schmidt, L. D. Benjaafar, S., Tiffany, D. G., Daoutidi, P. 2011. Optimizing the Lignocellulosic Biomass-to-Ethanol Supply Chain: A Case Study for the Midwestern United States. 21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Elsevier. pp. 1728-1732.
- ASAE. 2012. ASAE S269.5 Densified Products for Bulk Handling -- Cubes, Pellets, and Crumbles - Definitions and Methods for Determining Density, Durability, and Moisture Content. ASAE Standard. St. Joseph, Michigan, U.S.A.
- Antane, E., Blumberga, D. 2017. Optimisation of resources flows in pellet manufacture. *Energy Procedia*, 128, 358-362.
- 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), 169-175.
- Asadullah, M., Adi, A. M., Suhada, N., Malek, N. H., Saringat, M. I., Azdarpour, A. 2014. Optimization of palm kernel shell torrefaction to produce energy densified bio-coal. *Energy Conversion and Management*, 88, 1086-1093.
- ASAE S319.3. 2003. Methods for determining and expressing fineness of feed materials by sieving., 2008, S319.2.
- ASTM D1102-84. 2021. Standard Test Method for Ash in Wood. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM E872-82. 2019. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Avcioğlu, A. O., Dayioğlu, M. A., Türker, U. 2019. Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. *Renewable Energy*, 138, 610-619.
- Azócar, L., Hermosilla, N., Gay, A., Rocha, S., Díaz, J., Jara, P. 2019. Brown pellet production using wheat straw from southern cities in Chile. *Fuel*, 237, 823-832.
- Basu, P. 2018. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction - Practical Design and Theory. Halifax, NS, Canada: Elsevier.
- Beets, M. 2017. A Torrefied Wood Pellet Supply Chain - a detailed cost analysis of the competitiveness of torrefied wood pellets compared to white wood pellets. Master thesis. Utrecht University, Utrecht, 44 p.
- Behnke, K. C. 2019. Factors Influencing Pellet Quality. Manhattan, Kansas, USA.
- Berghel, J., Frodeson, S., Granström, K., Renström, R., Ståhl, M., Nordgren, D., Tomani, P. 2013. The effects of kraft lignin additives on wood fuel pellet quality, energy use and shelf life. *Fuel Processing Technology*, 112, 64-69.
- Bergström, D., Israelsson, S., Öhman, M., Dahlqvist, S. A., Gref, R., Boman, C., Wästerlund, I. 2008. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1324-1329.
- Bermejo, R. 2014. The Limits of Fossil Fuels. Handbook for a Sustainable Economy. Springer.
- Bilgin, S., Ertekin, C., Kürklü, A. 2012. Türkiye'deki Sera Bitkisel Biyokütle Atık Miktarının Belirlenmesi. 27. *Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi* (ss. 499-508).
- Brachi, P., Chirone, R., Miccio, M., Ruoppolo, G. 2018. Fluidized Bed Torrefaction of Commercial Wood Pellets: Process Performance and Solid Product Quality. *Energy and Fuels*, 32(9), 9459-9469.
- Brand, M. A., Mariano Rodrigues, T., Peretti da Silva, J., de Oliveira, J. 2021. Recovery of agricultural and wood wastes: The effect of biomass blends on the quality of pellets. *Fuel*, 284(July 2020).
- Brassard, P., Palacios, J. H., Godbout, S., Bussièeres, D., Lagacé, R., Larouche, J. P., Pelletier, F. 2014. Comparison of the gaseous and particulate matter emissions from the combustion of agricultural and forest biomasses. *Bioresource Technology*, 155, 300-306.
- Briggs, J. L., Maier, D. E., Watkins, B. A., Behnke, K. C. 1999. Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality. *Poultry Science*, 78(10), 1464-1471.
- Calderón, C., Colla, M., Jossart, J.-M., Hemeleers, N., Cancian, G., Aveni, N., Caferri, C. 2019. BioEnergy Europe Statiscital Report (C. 1). Place du Champ de Mars 2A 1050 Brussels. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Carone, M. T., Pantaleo, A., Pellerano, A. 2011. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 402-410.

- Carpita, N., MacCann, M. 2000. The cell wall. B. B. Buchanan, W. Gruissem, & R. L. Jones (Ed.), *Biochemistry and molecular biology of plants* (ss. 52-108). Maryland, Rockville: American Society of Plant Physiologists.
- Carroll, J. P., Finnan, J. 2012. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. *Biosystems Engineering*, 112(2), 151-159.
- Carvalho, L., Wopienka, E., Pointner, C., Lundgren, J., Verma, V. K., Haslinger, W., Schmidl, C. 2013. Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy*, 104(2013), 286-296.
- Cen, K., Zhang, J., Chen, D., Chen, F., Zhang, Y., Ma, H. 2020. Comparative study of the fuel quality and torrefaction performance of biomass and its molded pellets: effects of temperature and residence time. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*.
- Chen, C., Qu, B., Wang, W., Wang, W., Ji, G., Li, A. 2021. Rice husk and rice straw torrefaction: Properties and pyrolysis kinetics of raw and torrefied biomass. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101872.
- Chen, D., Gao, A., Cen, K., Zhang, J., Cao, X., Ma, Z. 2018. Investigation of biomass torrefaction based on three major components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energy Conversion and Management*, 228-237.
- Chen, W. H., Hsu, H. C., Lu, K. M., Lee, W. J., Lin, T. C. 2011. Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. *Energy*, 36(5), 3012-3021.
- Chen, W. H., Kuo, P. C. 2011. Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis. *Energy*, 36(11), 6451-6460.
- Chen, W. H., Lu, K. M., Liu, S. H., Tsai, C. M., Lee, W. J., Lin, T. C. 2013. Biomass torrefaction characteristics in inert and oxidative atmospheres at various superficial velocities. *Bioresource Technology*, 146, 152-160.
- Chen, W. H., Lu, K. M., Tsai, C. M. 2012. An experimental analysis on property and structure variations of agricultural wastes undergoing torrefaction. *Applied Energy*, 100, 318-325.
- Chen, W. H., Zhuang, Y. Q., Liu, S. H., Juang, T. T., Tsai, C. M. 2016. Product characteristics from the torrefaction of oil palm fiber pellets in inert and oxidative atmospheres. *Bioresource Technology*, 199, 367-374.
- Chew, J. J., Doshi, V. 2011. Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4212-4222.
- Civitarese, V., Acampora, A., Sperandio, G., Assirelli, A., Picchio, R. 2019. Production of wood pellets from poplar trees managed as coppices with Different harvesting cycles. *Energies*, 12(15).
- Clark, D., Brown, B. 2015. A Rapid Image Acquisition Method for Focus Stacking in Microscopy. *Microscopy Today*, 23(4), 18-25.

- Contreras-Trejo, J. C., Vega-Nieva, D. J., Heya, M. N., Prieto-Ruíz, J. A., Nava-Berúmen, C. A., Carrillo-Parra, A. 2022. Sintering and Fusibility Risks of Pellet Ash from Different Sources at Different Combustion Temperatures. *Energies*, 15(14).
- Covelli, C. 2016. Evaluation of dry steam preconditioning on switchgrass pellet quality metrics. PhD Thesis. The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 54 p.
- Çabuk, B. 2019. Ay Çekirdeği Küspesinden Biyokömür Eldesi ve Gazlaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 97 s.
- da Silva, C. M. S., Vital, B. R., Carneiro, A. de C. O., Costa, E. V. S., de Magalhães, M. A., Trugilho, P. F. 2017. Structural and compositional changes in eucalyptus wood chips subjected to dry torrefaction. *Industrial Crops and Products*, 109(September), 598-602.
- de Sales, C. A. V. B., Maya, D. M. Y., Lora, E. E. S., Jaén, R. L., Reyes, A. M. M., González, A. M., Martínez, J. D. 2017. Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a two-stage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents. *Energy Conversion and Management*, 145, 314-323.
- De Soete, G. G. 1991. Heterogeneous N₂O and NO formation from bound nitrogen atoms during coal char combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 23(1), 1257-1264.
- Demirbas, A. 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219-230.
- Deng, T., Alzahrani, A. M., Bradley, M. S. 2019. Influences of environmental humidity on physical properties and attrition of wood pellets. *Fuel Processing Technology*, 185(October 2018), 126-138.
- Djatkov, D., Martinov, M., Kaltschmitt, M. 2018. Influencing parameters on mechanical-physical properties of pellet fuel made from corn harvest residues. *Biomass and Bioenergy*, 119(January), 418-428.
- DoKyung, L. 2007. Composition of herbaceous biomass feedstocks. Sun Grant Initiative.
- Döring, S. 2013. Power from pellets: Technology and applications. *Power from Pellets: Technology and Applications*, 9783642199, 1-223.
- Duong, V. M., Flener, U., Hrbek, J., Hofbauer, H. 2022. Emission characteristics from the combustion of Acacia Mangium in the automatic feeding pellet stove. *Renewable Energy*, 186, 183-194.
- Dündar, Ö., Demircioğlu, H., Özkaya, O., Valizadeh, A., Daşgan, H. Y., Akhoundnejad, Y. 2017. Organik domates yetiştiriciliğinde farklı besin uygulamalarının muhafaza ve kalite özellikleri üzerine etkileri. *Akademik Ziraat Dergisi*, 6, 305-312.
- Dyjakon, A., Noszczyk, T., Mostek, A. 2021. Mechanical durability and grindability of pellets after torrefaction process. *Energies*, 14(20), 1-16.
- Elmay, Y., Trouvé, G., Jeguirim, M., Said, R. 2013. Energy recovery of date palm residues in a domestic pellet boiler. *Fuel Processing Technology*, 112, 12-18.

- Emami, S., Tabil, L. G., Adapa, P., George, E., Tilay, A., Dalai, A., ... Ketabi, L. 2014. Effect of fuel additives on agricultural straw pellet quality. *International Journal of Agriculture and Biology*, 7(72), 92-100.
- EN 15103. 2009. Solid biofuels – Determination of bulk density.
- EN 15210-1. 2009. Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets.
- ENplus. 2015. Pellet Quality Requirements. ENplus Handbook. Place du Champ de Mars 2 1050 Brussels, Belgium.
- European Biomass Association (AEBIOM). 2017. Pellet market overview. European Biomass Association. www.aebiom.org. [Son erişim tarihi: 12.07.2022]
- Evans, C. E., Saensukjaroenphon, M., Gebhardt, J. T., Stark, C. R., Paulk, C. B. 2021. Effects of conditioning temperature and pellet mill die speed on pellet quality and relative stabilities of phytase and xylanase. *Translational Animal Science*, 5(3).
- Falk, J., Berry, R. J., Broström, M., Larsson, S. H. 2015. Mass flow and variability in screw feeding of biomass powders - Relations to particle and bulk properties. *Powder Technology*, 276, 80-88.
- Fekete, B. M. 2013. Biomass. Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources, 3, 83-87.
- Formowitz, B. 2010. Certification of pellet stoves and boilers based on EN 14785 standard-Description of the test bench and preliminary results. İçinde 18th European Biomass Conference and Exhibition (ss. 3–7). Lyon, France
- Fournel, S., Palacios, J. H., Morissette, R., Villeneuve, J., Godbout, S., Heitz, M., Savoie, P. 2015. Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. *Applied Energy*, 141, 247-259.
- Fukasaku, Y. 1995. Energy and environment policy integration: The case of energy conservation policies and technologies in Japan. *Energy Policy*, 23(12), 1063-1076.
- Gaitán-Alvarez, J., Moya, R., Puente-Urbina, A., Rodríguez-Zuñiga, A. 2017. Physical and compression properties of pellets manufactured with the biomass of five woody tropical species of Costa Rica torrefied at different temperatures and times. *Energies*, 10(8).
- Garcia, D. P., Caraschi, J. C., Ventrone, G., Vieira, F. H. A., Protásio, T. de P. 2018. Comparative energy properties of torrefied pellets in relation to pine and elephant grass pellets. *BioResources*, 13(2), 2898-2906.
- García-Maraver, A., Ramos-Ridao, A. F., Ruiz, D. P., Zamorano, M. 2010. Quality of pellets from olive grove residual biomass. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ).
- Garcia-Maraver, A., Rodriguez, M. L., Serrano-Bernardo, F., Diaz, L. F., Zamorano, M. 2015. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. *Fuel Processing Technology*, 129, 1-7.

- Garcia-Maraver, A., Zamorano, M., Fernandes, U., Rabaçal, M., Costa, M. 2014. Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in a domestic pellet-fired boiler. *Fuel*, 119, 141-152.
- Ghadernejad, K., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A. 2012. Effect of moisture content and particle size on energy consumption for dairy cattle manure pellets. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14(3), 125-130.
- Ghiasi, B., Sokhansanj, S., Kumar, L., Lim, J. 2014. Production of high quality torrefied wood pellets with minimum energy consumption. <https://biomass.ubc.ca/> [Son erişim tarihi: 22.06.2022]
- Gil, Miguel, Arauzo, I., Teruel, E., Bartolom, C. 2012. Milling and handling *Cynara Cardunculus L.* for use as solid biofuel: Experimental tests. *Biomass and Bioenergy*, 41, 145-156.
- Gil, M. V., Oulego, P., Casal, M. D., Pevida, C., Pis, J. J., Rubiera, F. 2010. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource Technology*, 101(22), 8859-8867.
- Gilvari, H., de Jong, W., Schott, D. L. 2020. The effect of biomass pellet length, test conditions and torrefaction on mechanical durability characteristics according to ISO standard 17831-1. *Energies*, 13(11).
- Goyal, H. B., Seal, D., Saxena, R. C. 2008. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 504-517.
- Granados, D. A., Ruiz, R. A., Vega, L. Y., Chejne, F. 2017. Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. *Energy*, 139, 818-827.
- Grover, P. D., Mishra, S. K. 1996. Biomass Briquetting: Technology and Practices. Regional wood energy development program in Asia, field document no. 46. Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations; Regional Wood Energy Development Programme in Asia, (46), 1-48.
- Habib, M. A., Elshafei, M., Dajani, M. 2008. Influence of combustion parameters on NO_x production in an industrial boiler. *Computers and Fluids*, 37(1), 12-23.
- Harmsen, P., Huijgen, W., López, L., Bakker, R. 2010. Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic Biomass. Food and Biobased Research.
- Harun, N. Y., Afzal, M. T. 2016. Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends. *Procedia Engineering*, 148, 93-99.
- He, Z., Liu, S., Wang, S., Liu, W., Li, Y., Feng, X. 2022. Reduced Pollutant Emissions and Slagging Rate of Biomass Pellet Combustion by Optimizing the Multilayer Distribution of Secondary Air. *ACS Omega*.
- Hersh, M. A. 2006. The Economic and Politics of Energy Generation. Improving Stability in Developing Nations through Automation 2006. Woodhead Publishing Limited.

- Holm, J. K., Henriksen, U. B., Hustad, J. E., Sørensen, L. H. 2006. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. *Energy and Fuels*, 20(6), 2686-2694.
- Huang, Y., Finell, M., Larsson, S., Wang, X., Zhang, J., Wei, R., Liu, L. 2017. Biofuel pellets made at low moisture content – Influence of water in the binding mechanism of densified biomass. *Biomass and Bioenergy*, 98, 8-14.
- Huang, Z., Jiang, S., Guo, J., Wang, X., Tan, M., Xiong, R., ... Li, H. 2020. Oxidative Torrefaction of *Phragmites australis*: Gas-Pressurized Effects and Correlation Analysis Based on Color Value. *Energy and Fuels*, 34(9), 11073-11082.
- Huangfu, Y., Li, H., Chen, X., Xue, C., Chen, C., Liu, G. 2014. Effects of moisture content in fuel on thermal performance and emission of biomass semi-gasified cookstove. *Energy for Sustainable Development*, 21(1), 60-65.
- ISO/TS 17225-8. 2016. Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 8: Graded thermally treated and densified biomass fuels. Geneva, Switzerland.
- Jackson, J., Turner, A., Mark, T., Montross, M. 2016. Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill. *Fuel Processing Technology*, 148, 43-49.
- Jandačka, J., Holubčík, M., Papučík, Š., Nosek, R. 2012. Combustion of pellets from wheat straw. *Acta Montanistica Slovaca*, 17(4), 283-289.
- Jaya Shankar Tumuluru, Christopher T. Wright, J. R. H. and K. L. K. 2011. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5, 683-707.
- Joshi, Y. V. 2015. Torrefaction of herbaceous Biomass - A study of Product, Process and Technology.
- Juszczak, M., Lossy, K. 2012. Pollutant emission from a heat station supplied with agriculture biomass and wood pellet mixture. *Chemical and Process Engineering*. 33(2), 231-242.
- Kaliyan, N., Morey, R. V. 2010. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 101(3), 1082-1090.
- Kaliyan, N., Vance Morey, R. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337-359.
- Karaca, N. K. 2021. Türkiye pelet yakıtı sektörünün mevcut durumu ve gelecek öngörülere: Bir anket çalışması. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 148 s.
- Karkania, V., Fanara, E., Zabaniotou, A. 2012. Review of sustainable biomass pellets production - A study for agricultural residues pellets' market in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1426-1436.
- Kashaninejad, M., Tabil, L. G., Knox, R. 2014. Effect of compressive load and particle size on compression characteristics of selected varieties of wheat straw grinds. *Biomass and Bioenergy*, 60, 1-7.
- Keenan, J. H., Keyes, F. G. 1937. Thermodynamic Properties of Steam. Newyork: John Wiley & Sons, Inc.

- Kemp, R. 2011. The Dutch Energy Transition Approach. İçinde International Economics of Resource Efficiency. Physica-Verlag HD.
- Kern, F., Smith, A. 2008. Restructuring energy systems for sustainability? Energy transition policy in the Netherlands. *Energy Policy*, 36, 4093-4103.
- Kerr, A. J., Goring, D. A. I. 1975. The ultrastructural arrangement of the wood cell wall. *Cellulose Chemistry and Technology*, 9.
- Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H. W., Repke, J. U. 2016. Hay pellets - The influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production. *Fuel Processing Technology*, 148, 163-174.
- Koçer, A., Kürklü, A. 2020. Production of pellets from pruning residues and determination of pelleting physical properties. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-13.
- Kratky, L., Jirout, T. 2011. Biomass Size Reduction Machines for Enhancing Biogas Production. *Chemical Engineering and Technology*, 34(3), 391-399.
- Kulig, R., Laskowski, J. 2008. Effect of conditioning parameters on pellet temperature and energy consumption in the process of plant material pressing. *TEKA Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 8, 105-111.
- Kumar, L., Koukoulas, A. A., Mani, S., Satyavolu, J. 2017. Integrating torrefaction in the wood pellet industry: A critical review. *Energy and Fuels*, 31(1), 37-54.
- Kusumaningrum, W. B., Munawar, S. S. 2014. Prospect of bio-pellet as an alternative energy to substitute solid fuel based. *Energy Procedia*, 47, 303-309.
- Kymäläinen, M., Mäkelä, M. R., Hildén, K., Kukkonen, J. 2015. Fungal colonisation and moisture uptake of torrefied wood, charcoal, and thermally treated pellets during storage. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(6), 709-717.
- Labbé, R., Paczkowski, S., Knappe, V., Russ, M., Wöhler, M., Pelz, S. 2020. Effect of feedstock particle size distribution and feedstock moisture content on pellet production efficiency, pellet quality, transport and combustion emissions. *Fuel*, 263(4).
- Lamberg, H., Tissari, J., Jokiniemi, J., Sippula, O. 2013. Fine particle and gaseous emissions from a small-scale boiler fueled by pellets of various raw materials. *Energy and Fuels*, 27(11), 7044-7053.
- Larsson, S. H., Agar, D. A., Rudolfsson, M., da Silva Perez, D., Campargue, M., Kalén, G., Thyrel, M. 2021. Using the macromolecular composition to predict process settings that give high pellet durability in ring-die biomass pellet production. *Fuel*, 283, 119267.
- Larsson, S. H., Rudolfsson, M. 2012. Temperature control in energy grass pellet production - Effects on process stability and pellet quality. *Applied Energy*, 97, 24-29.
- Larsson, S. H., Thyrel, M., Geladi, P., Lestander, T. A. 2008. High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. *Bioresource Technology*, 99(15), 7176-7182.

- Lee, S. M., Lee, J. W. 2014. Optimization of biomass torrefaction conditions by the Gain and Loss method and regression model analysis. *Bioresource Technology*, 172, 438-443.
- Lestander, T. A., Finell, M., Samuelsson, R., Arshadi, M., Thyrel, M. 2012. Industrial scale biofuel pellet production from blends of unbarked softwood and hardwood stems-the effects of raw material composition and moisture content on pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 95, 73-77.
- Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Jim Lim, C., Sokhansanj, S. 2012. Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets. *Applied Energy*, 93, 680-685.
- Li, M. F., Chen, L. X., Li, X., Chen, C. Z., Lai, Y. C., Xiao, X., Wu, Y. Y. 2016. Evaluation of the structure and fuel properties of lignocelluloses through carbon dioxide torrefaction. *Energy Conversion and Management*, 119, 463-472.
- Lisowski, A., Olendzki, D., Świętochowski, A., Dąbrowska, M., Mieszkalski, L., Ostrowska-Ligeża, E., ... Piątek, M. 2019. Spent coffee grounds compaction process: Its effects on the strength properties of biofuel pellets. *Renewable Energy*, 142, 173-183.
- Lisowski, A., Pajor, M., Świętochowski, A., Dąbrowska, M., Klonowski, J., Mieszkalski, L., Piątek, M. 2019. Effects of moisture content, temperature, and die thickness on the compaction process, and the density and strength of walnut shell pellets. *Renewable Energy*, 141, 770-781.
- Liu, H., Chaney, J., Li, J., Sun, C. 2013. Control of NO_x emissions of a domestic/small-scale biomass pellet boiler by air staging. *Fuel*, 103, 792-798.
- Liu, Yafei, Li, Z., Floess, E., Zhang, Y., Lam, N., Mawusi, S. K., ... Liu, G. 2023. Field assessment of straw pellet combustion in improved heating stoves in rural Northeast China. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 295-307.
- Liu, Yalan, Wang, J., Wolcott, M. P. 2016. Assessing the specific energy consumption and physical properties of comminuted Douglas-fir chips for bioconversion. *Industrial Crops and Products*, 94, 394-400.
- Magdziarz, A., Wilk, M., Straka, R. 2017. Combustion process of torrefied wood biomass: A kinetic study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(2), 1339-1349.
- Mamvura, T. A., Danha, G. 2020. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*, 6(3).
- Mamvura, T. A., Pahla, G., Muzenda, E. 2018. Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa. *South African Journal of Chemical Engineering*, 25, 1-12.
- Mani, S., Tabil, L. G., Sokhansanj, S. 2003. An overview of compaction of biomass grinds. *Powder Handling and Processing*, 15(3), 160-168.
- Mani, Sudhagar, Tabil, L. G., Sokhansanj, S. 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 27(4), 339-352.

- Mani, Sudhagar, 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.
- Manouchehrinejad, M., Mani, S. 2018. Torrefaction after pelletization (TAP): Analysis of torrefied pellet quality and co-products. *Biomass and Bioenergy*, 118, 93-104.
- Martín-Lara, M. A., Ronda, A., Zamora, M. C., Calero, M. 2017. Torrefaction of olive tree pruning: Effect of operating conditions on solid product properties. *Fuel*, 202, 109-117.
- Masche, M., Puig-Arnavat, M., Jensen, P. A., Holm, J. K., Clausen, S., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B. 2019. From wood chips to pellets to milled pellets: The mechanical processing pathway of Austrian pine and European beech. *Powder Technology*, 350, 134-145.
- Medic, D. 2012. Investigation of torrefaction process parameters and characterization of torrefied biomass. PhD Thesis, Iowa State University, Iowa, 127 p.
- Milbrant, A. 2005. A geographic perspective on the current biomass resource availability in the United States. Technical Report: NREL/TP-560-39181.
- Miranda, M. T., Arranz, J. I., Román, S., Rojas, S., Montero, I., López, M., Cruz, J. A. 2011. Characterization of grape pomace and pyrenean oak pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(2), 278-283.
- Mohd Faizal, H., Shamsuddin, H. S., M. Heiree, M. H., Muhammad Ariff Hanaffi, M. F., Abdul Rahman, M. R., Rahman, M. M., Latiff, Z. A. 2018. Torrefaction of densified mesocarp fibre and palm kernel shell. *Renewable Energy*, 122, 419-428.
- Moliner, C., Lagazzo, A., Bosio, B., Botter, R., Arato, E. 2020. Production, Characterization, and Evaluation of Pellets from Rice Harvest Residues. *Energies*. 2020; 13(2):479.
- Munawar, S. S., Subiyanto, B. 2014. Characterization of Biomass Pellet Made from Solid Waste Oil Palm Industry. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 336-341.
- Müftüoğlu, M., Demirer, T. 1998. Toprakta Azot Bilançosu. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(1), 175-185.
- Na, B. I., Kim, Y. H., Lim, W. S., Lee, S. M., Lee, H. W., Lee, J. W. 2013. Torrefaction of oil palm mesocarp fiber and their effect on pelletizing. *Biomass and Bioenergy*, 52, 159-165.
- Nanou, P., Huijgen, W. J. J., Carbo, M. C., Kiel, J. H. A. 2018. The role of lignin in the densification of torrefied wood in relation to the final product properties. *Biomass and Bioenergy*, 111, 248-262.
- Nhuchhen, D., Basu, P., Acharya, B. 2014. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014, 1-56.
- Nhuchhen, D. R., Afzal, M. T. 2017. HHV predicting correlations for torrefied biomass using proximate and ultimate analyses. *Bioengineering*, 4(1).

- Niedziółka, I., Szpryngiel, M., Kachel-Jakubowska, M., Kraszkiwicz, A., Zawislak, K., Sobczak, P., Nadulski, R. 2015. Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy*, 76, 312-317.
- Nilsson, D., Bernesson, S., Hansson, P.-A. 2011. Pellet production from agricultural raw materials – A systems study. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 679-689.
- Nobre, C., Gonçalves, M., Mendes, B., Vilarinho, C., Teixeira, J. 2015. Torrefaction effects on composition and quality of biomass wastes pellets. *Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities - Selected Papers from the 3rd Edition of the International Conference on Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities*, 2015, (October), 171-176.
- Nska, M. D. zy, Nski, S. O., Piekut, J., Yildiz, G. 2020. The utilization of plum stones for pellet production and investigation of post-combustion flue gas emissions. *Energies*, 13(19).
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., Catalão, J. P. S. 2014. Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. *Applied Energy*, 127, 135-140.
- Nussbaumer, T. 2003. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy and Fuels*, 17(6), 1510-1521.
- Nyakuma, B. B., Oladokun, O., Wong, S. L., Abdullah, T. A. T. 2021. Torrefaction of oil palm empty fruit bunch pellets: product yield, distribution and fuel characterisation for enhanced energy recovery. *Biomass Conversion and Biorefinery*.
- Nyström, J., Dahlquist, E. 2004. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants - A review. *Fuel*, 83(7-8), 773-779.
- Obaidullah, M., Bram, S., Ruyck, J. De. 2020. Effect of Dilution Sampling on Particle Emissions and Size Distributions from a Modern Pellet Stove. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 15(1).
- Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G. 2006. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 973-982.
- Obidzinski, S., Dolzynska, M., Kowczyk-Sadowy, M., Jadwisienczak, K., Sobczak, P. 2019. Densification and fuel properties of onion husks. *Energies*, 12(24).
- Onsree, T., Tippayawong, N. 2021. Machine learning application to predict yields of solid products from biomass torrefaction. *Renewable Energy*, 167, 425–432.
- Orak Yeter, H. 2005. Biyokütle bileşenlerinin biyokütlenin termal davranımına etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.128 s.
- Oyedeji, O., Gitman, P., Qu, J., Webb, E. 2020. Understanding the Impact of Lignocellulosic Biomass Variability on the Size Reduction Process: A Review. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(6), 2327-2343.

- Öhman, M., Nordin, A., Hedman, H., Jirjis, R. 2004. Reasons for slagging during stemwood pellet combustion and some measures for prevention. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 597-605.
- Palsauskas, M., Petkevicius, S. 2013. A new approach to renewable energy : New mixed biomass pellets. *Journal of Food, Agricultura & Environment*, 11(2), 798-802.
- Patel, B., Gami, B., Bhimani, H. 2011. Improved fuel characteristics of cotton stalk, prosopis and sugarcane bagasse through torrefaction. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 372-375.
- Patel, M., Zhang, X., Kumar, A. 2016. Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1486-1499.
- Pegoretti Leite de Souza, H. J., Muñoz, F., Mendonça, R. T., Sáez, K., Olave, R., Segura, C., Rodríguez-Soalleiro, R. 2021. Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. *Renewable Energy*, 163, 1802-1816.
- Peng, J. H., Bi, H. T., Sokhansanj, S., Lim, J. C. 2012. A study of particle size effect on biomass torrefaction and densification. *Energy and Fuels*, 26(6), 3826-3839.
- Peng, Jiang Hong. 2012. A study of softwood torrefaction and densification for the production of high quality wood pellets. *Inflammation Research*, 1-207.
- Petrović Bećirović, S. B., Manić, N. G., Stojiljković, D. D. 2015. Impact of fuel quality and burner capacity on the performance of wood pellet stove. *Thermal Science*, 19(5), 1855-1866.
- Phanphanich, M. 2010. Pelleting Characteristics of Torrefied Forest Biomass. The PhD Thesis, University of Georgia, Georgia, 148 p.
- Phanphanich, M., Mani, S. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), 1246-1253.
- Picchi, G., Lombardini, C., Pari, L., Spinelli, R. 2018. Physical and chemical characteristics of renewable fuel obtained from pruning residues. *Journal of Cleaner Production*, 171, 457-463.
- Picchio, R., Latterini, F., Venanzi, R., Stefanoni, W., Suardi, A., Tocci, D., Pari, L. 2020. Pellet production from woody and non-woody feedstocks: A review on biomass quality evaluation. *Energies*, 13(11), 1-20.
- Pirraglia, A., Gonzalez, R., Saloni, D., Denig, J. 2013. Technical and economic assessment for the production of torrefied ligno-cellulosic biomass pellets in the US. *Energy Conversion and Management*, 66, 153-164.
- Pradhan, P., Arora, A., Mahajani, S. M. 2018. Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. *Energy for Sustainable Development*, 43, 1-14.
- Pradhan, P., Mahajani, S. M., Arora, A. 2018. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181(October), 215-232.

- Prins, M. J., Ptasiński, K. J., Janssen, F. J. J. G. 2006. Torrefaction of wood. Part 1. Weight loss kinetics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 77(1), 28-34.
- Purohit, A. N., Nautiyal, A. R. 1987. Fuelwood value index of indian mountain tree species. *International Tree Crops Journal*, 4(2-3), 177-182.
- Reed, T. B., Trezek, G., Diaz, L. 1980. Biomass Densification Energy Requirements. ACS Symposium Series, 1, 169-177.
- Ren, S., Lei, H., Wang, L., Bu, Q., Chen, S., Wu, J. 2013. Thermal behaviour and kinetic study for woody biomass torrefaction and torrefied biomass pyrolysis by TGA. *Biosystems Engineering*, 116(4), 420-426.
- Ren, S., Lei, H., Wang, L., Bu, Q., Wei, Y., Liang, J., Ruan, R. 2012. Microwave torrefaction of douglas fir sawdust pellets. *Energy and Fuels*, 26(9), 5936-5943.
- Ren, X., Sun, R., Meng, X., Vorobiev, N., Schiemann, M., Levendis, Y. A. 2017. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. *Fuel*, 188, 310-323.
- Rencoret, J., Gutiérrez, A., Castro, E., Del Río, J. C. 2019. Structural characteristics of lignin in pruning residues of olive tree (*Olea europaea* L.). *Holzforchung*, 73(1), 25-34.
- Rentsen, B. 2010. Characterization of Flax Shives and Factors Affecting the Quality of Fuel Pellets From Flax Shives. Master Thesis, University of Saskatchewan, Canada, 118 p.
- Requejo, A., Peleteiro, S., Garrote, G., Rodríguez, A., Jiménez, L. 2012. Biorefinery of olive pruning using various processes. *Bioresource Technology*, 111, 301-307.
- Rezaei, H., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Lau, A., Bi, X. 2018. Effects of the mass and volume shrinkage of ground chip and pellet particles on drying rates. *Particuology*, 38, 1-9.
- Riaz, S., Al-Abdeli, Y. M., Oluwoye, I., Altarawneh, M. 2021. Torrefaction of Densified Woody Biomass: The Effect of Pellet Size on Thermochemical and Thermophysical Characteristics. *BioEnergy Research*.
- Rokni, E., Ren, X., Panahi, A., Levendis, Y. A. 2018. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel*, 211(September 2017), 363-374.
- Roy, M. M., Dutta, A., Corscadden, K. 2013. An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. *Applied Energy*, 108, 298-307.
- Roy, M. M., Dutta, A., Corscadden, K., Havard, P. 2011. Co-combustion of Biosolids with Wood Pellets in a Wood Pellet Stove. *International Journal of Engineering & Technology*, 11(03), 7-15.
- Rudolfsson, M., Agar, D. A., Lestander, T. A., Larsson, S. H. 2020. Energy savings through late-steam injection – A new technique for improving wood pellet production. *Journal of Cleaner Production*, 254.

- Rudolfsson, M., Borén, E., Pommer, L., Nordin, A., Lestander, T. A. 2017. Combined effects of torrefaction and pelletization parameters on the quality of pellets produced from torrefied biomass. *Applied Energy*, 191, 414-424.
- Ruiz Celma, A., Cuadros, F., López-Rodríguez, F. 2012. Characterization of pellets from industrial tomato residues. *Food and Bioproducts Processing*, 90(4), 700-706.
- Sadaka, S., Negi, S. 2009. Effect of Hydrothermal Carbonization Reaction Parameters on. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28(3), 427-434.
- Saha, S. 2010. Pelletizing and characterization of dry distillers' grain with solubles pellets as bio-fuel. Master Thesis, University of Saskatchewan Saskatoon, Canada, 141 p.
- Samuelsson, R., Larsson, S. H., Thyrel, M., Lestander, T. A. 2012. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. *Applied Energy*, 99, 109-115.
- Samuelsson, R., Thyrel, M., Sjöström, M., Lestander, T. A. 2009. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 90(9), 1129-1134.
- Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., Portero, H. 2011. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 699-706.
- Shang, L., Nielsen, N. P. K., Dahl, J., Stelte, W., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Henriksen, U. B. 2012. Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine. *Fuel Processing Technology*, 101, 23-28.
- Shen, G., Chen, Y., Xue, C., Lin, N., Huang, Y., Shen, H., Tao, S. 2015. Pollutant emissions from improved coal- and wood-fuelled cookstoves in rural households. *Environmental Science and Technology*, 49(11), 6590-6598.
- Si, Y., Hu, J., Wang, X., Yang, H., Chen, Y., Shao, J., Chen, H. 2016. Effect of Carboxymethyl Cellulose Binder on the Quality of Biomass Pellets. *Energy and Fuels*, 30(7), 5799-5808.
- Sikarwar, V. S., Zhao, M., Clough, P., Yao, J., Zhong, X., Memon, M. Z., Fennell, P. S. 2016. An overview of advances in biomass gasification. *Energy and Environmental Science*, 9(10), 2939-2977.
- Singh, K., Zondlo, J. 2017. Characterization of fuel properties for coal and torrefied biomass mixtures. *Journal of the Energy Institute*, 90(4), 505-512.
- Sjaak, van L., Koppejan, J. 2016. The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, (January), 426.
- Skoch, E. R., Behnke, K. C., Deyoe, C. W., Binder, S. F. 1981. The effect of steam-conditioning rate on the pelletizing process. *Animal Feed Science and Technology*, 6(1), 83-90.
- Smil, V. 2004. World History and Energy. *Encyclopedia of Energy*, 6, 549-561.
- Smil, V. 2010. *Energy Transitions: History, Requirements*. Santa Barbara, California: ABC-CLI, LLC.

- Solomon, B. D., Krishna, K. 2011. The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook. *Energy Policy*, 39(11), 7422-7431.
- Spîrchez, C., Lunguleasa, A., Antonaru, C. 2017. Experiments and modeling of the torrefaction of white wood fuel pellets. *BioResources*, 12(4), 8595-8611.
- Ståhl, M., Granström, K., Berghel, J., Renström, R. 2004. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 621-628.
- Stelte, W., Barsberg, S. T., Clemons, C., Morais, J. P. S., de Freitas Rosa, M., Sanadi, A. R. 2019. Coir Fibers as Valuable Raw Material for Biofuel Pellet Production. *Waste and Biomass Valorization*, 10(11), 3535-3543.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Ahrenfeldt, J., Shang, L., Henriksen, U. B. 2011. Pelletizing properties of torrefied spruce. *Biomass and Bioenergy*, 35(11), 4690-4698.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B. 2011. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 910-918.
- Stelte, W., Nielsen, N. P. K., Hansen, H. O., Dahl, J., Shang, L., Sanadi, A. R. 2013. Reprint of: Pelletizing properties of torrefied wheat straw. *Biomass and Bioenergy*, 53, 105-112.
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B. 2012. Recent developments in biomass pelletization - a review. *BioResources*, 7(3), 4451-4490.
- Strandberg, M. 2015. From torrefaction to gasification - Pilot scale studies for upgrading of biomass. PhD Thesis, Department of applied Physics and Electornics, Umea University, İsveç, 72 p.
- Sun, Y., Cheng, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresource Technology*, 83(1), 1-11.
- Talero Rojas, G. F., Rincón Prat, S. L., Gonzalez Hassig, A. 2016. Use of Colombian oil palm wastes for pellets production: reduction of the process energy consumption by modifying moisture content. WasteEng - 6th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, (September), 672-684.
- Tanaka, M., Yamada, H., Nakamura, T., Watanabe, Y. 2012. Effects of pellet stove on recovery from mental fatigue.. Medical science monitor : international medical journal of experimental and clinical research, 18(3), CR148-53.
- Theerarattananoon, K., Xu, F., Wilson, J., Ballard, R., Mckinney, L., Staggenborg, S., Wang, D. 2011. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*, 33(2), 325-332.
- Thomas, M., Van Vliet, T., Van Der Poel, A. F. B. 1998. Physical quality of pelleted animal feed 3. Contribution of feedstuff components. *Animal Feed Science and Technology*, 70(1-2), 59-78.

- Thrän, D., Schaubach, K., Peetz, D., Junginger, M., Mai-Moulin, T., Schipfer, F., Lamers, P. 2019. The dynamics of the global wood pellet markets and trade – key regions, developments and impact factors. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(2), 267-280.
- Thyrel, M., Samuelsson, R., Finell, M., Lestander, T. A. 2013. Critical ash elements in biorefinery feedstock determined by X-ray spectroscopy. *Applied Energy*, 102, 1288-1294.
- Trojanowski, R., Butcher, T., Wei, G., Celebi, Y. 2018. Repeatability in Particulate and Gaseous Emissions from Pellet Stoves for Space Heating. *Energy and Fuels*, 32(3), 3543-3550.
- Tumuluru, J. S. 2014. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. *Biosystems Engineering*, 119, 44-57.
- Tumuluru, J. S. 2015. High moisture corn stover pelleting in a flat die pellet mill fitted with a 6 mm die: Physical properties and specific energy consumption. *Energy Science and Engineering*, 3(4), 327-341.
- Tumuluru, J. S. 2018. Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. *Carbon Resources Conversion*, 1(1), 44-54.
- Tumuluru, J. S., Boardman, R., Wright, C. 2010. Changes in moisture, carbon, nitrogen, sulphur, volatiles, and calorific value of miscanthus during torrefaction. AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings.
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, R., Kenney, K. L. 2011. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), 246-256.
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Kenney, K. L., Hess, J. R. 2010. A technical review on biomass processing: Densification, preprocessing, modeling and optimization. American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2010, ASABE 2010, 6(10), 4594-4625.
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Kenny, K. L., Hess, J. R. 2010. A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application. Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015, (August).
- TÜİK. 2022. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111&dil=1> [Son erişim tarihi: 11.08.2022]
- Tükenmez, M., Demireli, E. 2012. Renewable energy policy in Turkey with the new legal regulations. *Renewable Energy*, 39(1), 1-9.
- Tymoszuk, M. 2017. Investigations of torrefied biomass grindability using a modified Hardgrove test. E3S Web of Conferences, 14.
- van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., Ptasiński, K. J. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748-3762.

- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., Lewis, B. A. 1991. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597.
- Verma, V. K., Bram, S., Gauthier, G., De Ruyck, J. 2011. Performance of a domestic pellet boiler as a function of operational loads: Part-2. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 272-279.
- Vukmirović, Đ., Ivanov, D., Čolović, R., Kokić, B., Lević, J., Đuragić, O., Sredanović, S. 2010. Effect of steam conditioning on physical properties of pellets and energy consumption in pelleting process. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 14(2), 106-108.
- Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., Nielsen, H. K. 2020. Effect of torrefaction on properties of pellets produced from woody biomass. *Energy and Fuels*, 34(12), 15343-15354.
- Wannapeera, J., Worasuwanarak, N. 2012. Upgrading of woody biomass by torrefaction under pressure. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 96, 173–180.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T., Siagi, Z. 2000. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1), 1-27.
- Whittaker, C., Shield, I. 2017. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(December 2016), 1-11.
- Wilson, T. O. 2010. Factors affecting wood pellet durability. Master Thesis. Agricultural and Biological Engineering, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 86 p.
- Wongsiriamnuay, T., Tippayawong, N. 2015. Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. *Biosystems Engineering*, 139, 111-120.
- World Health Organization, Organization, W. H. O. W. H. 2005. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. WHO/SDE/PHE/OEH/, 0602.
- Wöhler, M., Jaeger, D., Reichert, G., Schmidl, C., Pelz, S. K. 2017. Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions. *Renewable Energy*, 105(2017), 66-75.
- 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, 668-676.
- Yaraş, K. 2012. Sera koşullarında toprağa uygulanan mikronize -bentonitli- kükürt ve organik maddenin toprak ph'sı, domatesin bitki büyümesi, verimi ve meyve kalitesi üzerine etkisi. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi* 5(1), 175-180.
- Yılmaz, H., Çanakcı, M., Topakcı, M., Karayel, D. 2021a. The effect of raw material moisture and particle size on agri-pellet production parameters and physical properties: A case study for greenhouse melon residues. *Biomass and Bioenergy*, 150(December 2020), 106125.

- Yılmaz, H., Topakcı, M., Varol, M., Karayel, D., Çanakcı, M. 2021b. Effect of Torrefaction Conditions on Physical and Thermal Properties of High- and Low-Quality Palm Pruning Residue Pellets. *Bioenergy Research*, 15, 530–543
- Yılmaz, H., Topakcı, M., Çanakcı, M., Karayel, D. 2021c. Çim Peleti Üretiminde Kalıp Delik Çapı ve Nem İçeriğinin Üretim Parametreleri ve Pelet Fiziksel Özelliklerine Etkisi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9(1), 47-56.
- Yılmaz, H., Topakcı, M., Karayel, D., Çanakcı, M. 2020. Comparison of the physical properties of cotton and sesame stalk pellets produced at different moisture contents and combustion of the finest pellets. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*.
- Yoshida, T., Nomura, T., Gensai, H., Watada, H., Sano, T., Ohara, S. 2015. Upgraded Pellet Making by Torrefaction—Torrefaction of Japanese Wood Pellets. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 05(03), 82-88.
- Zamorano, M., Popov, V., Rodríguez, M. L., García-Maraver, A. 2011. A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues. *Renewable Energy*, 36(11), 3133-3140.
- Zhang, Q., Shi, Z., Zhang, P., Li, Z., Jaber-Douraki, M. 2017. Predictive temperature modeling and experimental investigation of ultrasonic vibration-assisted pelleting of wheat straw. *Applied Energy*, 205(July), 511-528.
- Zhao, W., Li, Z., Wang, D., Zhu, Q., Sun, R., Meng, B., Zhao, G. 2008. Combustion characteristics of different parts of corn straw and NO formation in a fixed bed. *Bioresource Technology*, 99(8), 2956-2963.
- Zheng, A., Jiang, L., Zhao, Z., Huang, Z., Zhao, K., Wei, G., ... Li, H. 2015. Impact of Torrefaction on the Chemical Structure and Catalytic Fast Pyrolysis Behavior of Hemicellulose, Lignin, and Cellulose. *Energy and Fuels*, 29(12), 8027-8034.
- Zvicevičius, E., Raila, A., Čiplienė, A., Černiauskienė, Ž., Kadžiulienė, Ž., Tilvikienė, V. 2018. Effects of moisture and pressure on densification process of raw material from *Artemisia dubia* Wall. *Renewable Energy*, 119, 185-192.

7. EKLER

EK-1. Sera domates sapı artıklarının farklı buhar düzeylerinde peletlenmesi ve farklı sıcaklıklarda torefikasyon uygulamasına ilişkin varyans analiz tablosu

| Uygulama | Bağımsız Değişken | Serbestlik Derecesi | Kareler Ortalaması | F | P |
|--|----------------------|---------------------|--------------------|----------|---------|
| Buhar Düzeyi | Pelet Nemi | 3 | 9.670 | 687.356 | <0.0001 |
| | Boy | 3 | 9.067 | 9.504 | <0.0001 |
| | Çap | 3 | 0.007 | 16.980 | <0.0001 |
| | Kütle | 3 | 0.026 | 18.455 | <0.0001 |
| | Parça Yoğunluğu | 3 | 1806.279 | 3.336 | 0.0310 |
| | Yığın Yoğunluğu | 3 | 1890.558 | 65.058 | <0.0001 |
| | Mekanik Dayanıklılık | 3 | 12.929 | 15.722 | <0.0001 |
| | Kuvvet | 3 | 2056653.079 | 24.908 | <0.0001 |
| | Bası Dayanımı | 3 | 45.157 | 28.956 | <0.0001 |
| Torefikasyon Sıcaklığı | Pelet Nemi | 3 | 45.160 | 3209.934 | <0.0001 |
| | Boy | 3 | 7.302 | 7.654 | 0.0010 |
| | Çap | 3 | 0.037 | 90.523 | <0.0001 |
| | Kütle | 3 | 0.059 | 42.011 | <0.0001 |
| | Parça Yoğunluğu | 3 | 23021.233 | 42.523 | <0.0001 |
| | Yığın Yoğunluğu | 3 | 10858.648 | 373.667 | <0.0001 |
| | Mekanik Dayanıklılık | 3 | 3.357 | 4.082 | 0.0150 |
| | Kuvvet | 3 | 2365620.646 | 28.650 | <0.0001 |
| | Bası Dayanımı | 3 | 51.956 | 33.316 | <0.0001 |
| Buhar Düzeyi x Torefikasyon Sıcaklığı İnteraksiyonu | Pelet Nemi | 9 | 0.340 | 24.172 | <0.0001 |
| | Boy | 9 | 2.287 | 2.397 | 0.0330 |
| | Çap | 9 | 0.003 | 7.743 | <0.0001 |
| | Kütle | 9 | 0.004 | 2.551 | 0.0250 |
| | Parça Yoğunluğu | 9 | 568.333 | 1.050 | 0.4240 |
| | Yığın Yoğunluğu | 9 | 85.834 | 2.954 | 0.0110 |
| | Mekanik Dayanıklılık | 9 | 0.532 | 0.647 | 0.7490 |
| | Kuvvet | 9 | 176316.668 | 2.135 | 0.0390 |
| | Bası Dayanımı | 9 | 3.679 | 2.359 | 0.0230 |

EK-2. Sera domates sapı artıklarının peletlenmesinde buhar düzeyinin üretim parametrelerine etkisine ilişkin varyans analiz tablosu

| Uygulama | Bağımsız Değişken | Serbestlik Derecesi | Kareler Ortalaması | F | P |
|---------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|--------|---------|
| Buhar Düzeyi | Üretim Kapasitesi (ob) | 3 | 3693.462 | 92.242 | <0.0001 |
| | Üretim Kapasitesi (kb) | 3 | 2876.974 | 87.827 | <0.0001 |
| | Enerji Tüketimi | 3 | 6.050 | 59.505 | <0.0001 |
| | Özgül Enerji Tüketimi (ob) | 3 | 4975.729 | 64.334 | <0.0001 |
| | Özgül Enerji Tüketimi (kb) | 3 | 5588.518 | 59.350 | <0.0001 |

EK-3. Sera domates sapı artıklarının peletlenmesinde buhar düzeyinin pelet fiziksel özelliklerine etkisi

| Faktörler | Pelet nemi (%) | Pelet boyu (mm) | Pelet çapı (mm) | Pelet kütlesi (g) | Parça Yoğunluğu (kg/m ³) | Yığın yoğunluğu (kg/m ³) | Mekanik dayanıklılık (%) | Kuvvet (N) | Bası dayanımı (MPa) |
|---------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| B0 _{T0,T1,T2,T3} | 3.95c | 19.65b | 6.10b | 0.75b | 1307.41b | 774.60c | 96.72c | 759.25c | 3.73c |
| B1 _{T0,T1,T2,T3} | 5.62b | 21.44a | 6.15a | 0.85a | 1329.44a | 785.85b | 97.98b | 1057.80b | 5.15b |
| B2 _{T0,T1,T2,T3} | 5.76a | 21.35a | 6.15a | 0.85a | 1332.90a | 799.60a | 98.87a | 1495.90a | 7.17a |
| B3 _{T0,T1,T2,T3} | 5.83a | 21.38a | 6.14a | 0.84a | 1332.86a | 801.24a | 98.95a | 1317.00a | 6.38a |
| Önemlilik | * | * | * | * | * | * | * | * | * |

EK-4. Sera domates sapı artıkları peletlerinde torefikasyon sıcaklığının pelet fiziksel özelliklerine etkisi

| Faktörler | Pelet nemi (%) | Pelet boyu (mm) | Pelet çapı (mm) | Pelet kütlesi (g) | Parça Yoğunluğu (kg/m ³) | Yığm yoğunluğu (kg/m ³) | Mekanik dayanıklılık (%) | Kuvvet (N) | Bası dayanımı (MPa) |
|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| T0B0,B1,B2,T3 | 7.95a | 22.05a | 6.18a | 0.91a | 1378.23a | 824.75a | 98.71a | 1499.00a | 7.25a |
| T1B0,B1,B2,T3 | 5.46b | 20.85b | 6.17a | 0.84b | 1338.81b | 804.30b | 98.39a | 1341.15a | 6.41b |
| T2B0,B1,B2,T3 | 4.18c | 20.70b | 6.13b | 0.80c | 1310.91c | 775.12c | 97.92b | 1077.35b | 5.24c |
| T3B0,B1,B2,T3 | 3.57d | 20.22b | 6.06c | 0.74d | 1274.66d | 757.12d | 97.50b | 712.45c | 3.54d |
| Önemlilik | * | * | * | * | * | * | * | * | * |

EK-5. Sera domates sapı artıklarında buhar x torefikasyon sıcaklığı interaksyonunun pelet fiziksel özellikleri üzerine etkisi

| Buhar düzeyi | Torefikasyon Sıcaklığı | Pelet nemi (%) | Pelet boyu (mm) | Pelet çapı (mm) | Pelet kütlesi (g) | Parça Yoğunluğu (kg/m ³) | Yığın yoğunluğu (kg/m ³) | Mekanik dayanıklılık (%) | Kuvvet (N) | Bası dayanımı (MPa) |
|------------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| B0 | T0 | 6.12a | 21.56a | 6.15ab | 0.88a | 1353.79a | 812.00a | 97.85a | 1275.20a | 6.19a |
| | T1 | 4.02b | 19.08b | 6.17a | 0.76b | 1341.02a | 789.21b | 97.36ab | 879.00b | 4.31b |
| | T2 | 3.06c | 19.91ab | 6.11b | 0.75b | 1281.83b | 753.21c | 96.19ab | 510.00c | 2.48c |
| | T3 | 2.59d | 18.09b | 5.96c | 0.63c | 1253.01b | 743.97c | 95.47b | 372.80c | 1.92c |
| B1 | T0 | 8.48a | 23.39a | 6.20a | 0.97a | 1370.04a | 821.16a | 98.66a | 1306.80a | 6.43a |
| | T1 | 5.47b | 20.74b | 6.17ab | 0.84b | 1351.42a | 790.62b | 98.16a | 1450.40a | 6.69a |
| | T2 | 4.78c | 21.38ab | 6.16b | 0.84b | 1322.96b | 775.09c | 97.83a | 832.00b | 4.17b |
| | T3 | 3.75d | 20.25b | 6.05c | 0.74b | 1273.32c | 756.58d | 97.27a | 642.00b | 3.31b |
| B2 | T0 | 8.54a | 21.29a | 6.17a | 0.89a | 1395.54a | 832.43a | 99.22a | 1993.60a | 9.53a |
| | T1 | 6.38b | 22.04a | 6.17a | 0.87ab | 1323.74b | 816.32b | 99.08a | 1584.20ab | 7.55b |
| | T2 | 4.34c | 21.03a | 6.18a | 0.88bc | 1321.65b | 787.44c | 98.72a | 1491.20b | 7.17b |
| | T3 | 3.84d | 21.08a | 6.11b | 0.80c | 1290.68b | 762.22d | 98.45a | 914.60c | 4.42c |
| B3 | T0 | 8.68a | 21.97a | 6.18a | 0.92a | 1393.56a | 833.42a | 99.10a | 1420.40a | 6.85a |
| | T1 | 6.04b | 21.58a | 6.17a | 0.86b | 1339.07b | 821.06b | 98.94a | 1451.00a | 7.07a |
| | T2 | 4.55c | 20.47b | 6.11b | 0.79c | 1317.18b | 784.74c | 98.94a | 1476.20a | 7.13a |
| | T3 | 4.08d | 21.49a | 6.09b | 0.80c | 1281.65c | 765.74d | 98.81a | 920.40b | 4.46b |
| Önemlilik | | * | * | * | * | - | * | - | - | - |

EK-6. Zeytin budama artıklarının farklı buhar düzeylerinde peletlenmesi ve farklı sıcaklıklarda torefikasyon uygulamasına ilişkin varyans analiz tablosu

| Uygulama | Bağımsız Değişken | Serbestlik Derecesi | Kareler Ortalaması | F | P |
|--|----------------------|---------------------|--------------------|----------|---------|
| Buhar Düzeyi | Pelet Nemi | 3 | 12.437 | 822.984 | <0.0001 |
| | Boy | 3 | 4.714 | 11.328 | <0.0001 |
| | Çap | 3 | 0.017 | 37.290 | <0.0001 |
| | Kütle | 3 | 0.003 | 4.706 | 0.0080 |
| | Parça Yoğunluğu | 3 | 7709.600 | 13.627 | <0.0001 |
| | Yığın Yoğunluğu | 3 | 3275.602 | 51.134 | <0.0001 |
| | Mekanik Dayanıklılık | 3 | 9.777 | 10.038 | <0.0001 |
| | Kuvvet | 3 | 1078865.418 | 12.226 | <0.0001 |
| | Bası Dayanımı | 3 | 25.026 | 14.385 | <0.0001 |
| Torefikasyon Sıcaklığı | Pelet Nemi | 3 | 70.008 | 4632.459 | <0.0001 |
| | Boy | 3 | 1.243 | 2.988 | 0.0460 |
| | Çap | 3 | 0.045 | 96.789 | <0.0001 |
| | Kütle | 3 | 0.025 | 38.691 | <0.0001 |
| | Parça Yoğunluğu | 3 | 17851.164 | 31.553 | <0.0001 |
| | Yığın Yoğunluğu | 3 | 2601.474 | 40.611 | <0.0001 |
| | Mekanik Dayanıklılık | 3 | 4.327 | 4.443 | 0.0100 |
| | Kuvvet | 3 | 2638346.414 | 29.899 | <0.0001 |
| | Bası Dayanımı | 3 | 62.345 | 35.837 | <0.0001 |
| Buhar Düzeyi x Torefikasyon Sıcaklığı İnteraksiyonu | Pelet Nemi | 9 | 0.991 | 65.579 | <0.0001 |
| | Boy | 9 | 0.540 | 1.299 | 0.2760 |
| | Çap | 9 | 0.002 | 4.718 | <0.0001 |
| | Kütle | 9 | 0.000 | 0.697 | 0.7070 |
| | Parça Yoğunluğu | 9 | 1401.268 | 2.477 | 0.0280 |
| | Yığın Yoğunluğu | 9 | 24.373 | 0.380 | 0.9360 |
| | Mekanik Dayanıklılık | 9 | 0.038 | 0.039 | 1.0000 |
| | Kuvvet | 9 | 100631.810 | 1.140 | 0.3480 |
| | Bası Dayanımı | 9 | 2.090 | 1.201 | 0.3100 |

EK-7. Zeytin budama artıklarının peletlenmesinde buhar düzeyinin üretim parametrelerine etkisine ilişkin varyans analiz tablosu

| Uygulama | Bağımsız Değişken | Serbestlik Derecesi | Kareler Ortalaması | F | P |
|---------------------|----------------------------|---------------------|--------------------|--------|---------|
| Buhar Düzeyi | Üretim Kapasitesi (ob) | 3 | 795.366 | 37.110 | <0.0001 |
| | Üretim Kapasitesi (kb) | 3 | 585.395 | 31.284 | <0.0001 |
| | Enerji Tüketimi | 3 | 0.686 | 4.520 | 0.039 |
| | Özgül Enerji Tüketimi (ob) | 3 | 3646.085 | 16.946 | <0.0001 |
| | Özgül Enerji Tüketimi (kb) | 3 | 3594.970 | 14.683 | <0.0001 |

EK-8. Zeytin budama artıklarının peletlenmesinde buhar düzeyinin pelet fiziksel özelliklerine etkisi

| Faktörler | Pelet nemi (%) | Pelet boyu (mm) | Pelet çapı (mm) | Pelet kütlesi (g) | Parça Yoğunluğu (kg/m ³) | Yığın yoğunluğu (kg/m ³) | Mekanik dayanıklılık (%) | Kuvvet (N) | Bası dayanımı (MPa) |
|----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| B0 _{T0,T1,T2,T3} | 3.59d | 21.80a | 6.15b | 0.77b | 1190.30c | 704.960c | 95.42b | 1036.57b | 5.07bc |
| B1 _{T0,T1,T2,T3} | 4.56c | 21.50a | 6.15b | 0.78b | 1216.09b | 722.698b | 96.97a | 1485.79a | 7.20a |
| B2 _{T0,T1,T2,T3} | 5.30b | 21.79a | 6.22a | 0.81a | 1217.44b | 737.283a | 97.43a | 1079.01b | 5.56b |
| B3 _{T0,T1,T2,T3} | 5.96a | 20.48b | 6.20a | 0.78b | 1252.06a | 741.475a | 97.15a | 972.99b | 4.64c |
| Önemlilik | * | * | * | * | * | * | * | - | - |

EK-9. Zeytin budama artıkları peletlerinde torefikasyon sıcaklığının pelet fiziksel özelliklerine etkisi

| Faktörler | Pelet nemi (%) | Pelet boyu (mm) | Pelet çapı (mm) | Pelet kütlesi (g) | Parça Yoğunluğu (kg/m ³) | Yığın yoğunluğu (kg/m ³) | Mekanik dayanıklılık (%) | Kuvvet (N) | Bası dayanımı (MPa) |
|------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| T0B0,B1,B2,B3 | 8.03a | 21.45ab | 6.20b | 0.82a | 1269.35a | 743.00a | 97.48a | 1491.38a | 7.22a |
| T1B0,B1,B2,B3 | 5.27b | 21.78a | 6.22a | 0.81a | 1220.41b | 733.14b | 96.92ab | 1330.18a | 6.56a |
| T2B0,B1,B2,B3 | 3.67c | 21.34ab | 6.20b | 0.78b | 1210.12b | 721.31c | 96.49b | 1096.87b | 5.51b |
| T3B0,B1,B2,B3 | 2.44d | 21.00b | 6.09c | 0.72c | 1176.02c | 708.97d | 96.09b | 655.94c | 3.19c |
| Önemlilik | * | * | * | * | * | * | * | * | * |

EK-10. Zeytin budama artıklarında buhar x torefikasyon sıcaklığı etkisinin parçacık miktarı, yoğunluğu, mekanik dayanıklılığı, kuvveti ve bası dayanımı üzerine etkisi

| Buhar düzeyi | Torefikasyon Sıcaklığı | Pelet nemi (%) | Pelet boyu (mm) | Pelet çapı (mm) | Pelet kütlesi (g) | Parça Yoğunluğu (kg/m ³) | Yığın yoğunluğu (kg/m ³) | Mekanik dayanıklılık (%) | Kuvvet (N) | Bası dayanımı (MPa) |
|------------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| B0 | T0 | 6.46a | 22.04a | 6.17a | 0.82a | 1237.40a | 725.44a | 96.23a | 1451.09a | 7.03a |
| | T1 | 4.28b | 22.54a | 6.20a | 0.81a | 1192.74b | 712.45ab | 95.46a | 1073.96b | 5.25b |
| | T2 | 2.59c | 20.99a | 6.18a | 0.75ab | 1189.59b | 697.65bc | 95.12a | 1039.41b | 5.16b |
| | T3 | 1.03d | 21.63a | 6.04b | 0.71b | 1141.47c | 684.30c | 94.86a | 581.82c | 2.84c |
| B1 | T0 | 7.08a | 21.49a | 6.16a | 0.83a | 1289.64a | 736.12a | 97.78a | 1891.37a | 8.92a |
| | T1 | 5.07b | 21.88a | 6.18a | 0.80a | 1225.03b | 728.61ab | 97.12a | 1797.19a | 8.53a |
| | T2 | 3.79c | 21.85a | 6.16a | 0.78a | 1198.27c | 716.81bc | 96.81a | 1458.04a | 7.31a |
| | T3 | 2.28d | 20.80a | 6.09b | 0.70b | 1151.42d | 709.25c | 96.16a | 796.57b | 4.03b |
| B2 | T0 | 8.32a | 21.54a | 6.22a | 0.84a | 1285.11a | 752.16a | 98.05a | 1353.78a | 6.86a |
| | T1 | 5.44b | 21.93a | 6.27a | 0.82a | 1216.32b | 744.85ab | 97.65a | 1262.61a | 6.49a |
| | T2 | 4.27c | 21.86a | 6.28a | 0.81a | 1195.12bc | 731.98b | 97.21a | 1138.44a | 6.00a |
| | T3 | 3.17d | 21.84a | 6.10b | 0.75b | 1173.20c | 720.14c | 96.82a | 561.20b | 2.88b |
| B3 | T0 | 10.26a | 20.73a | 6.26a | 0.81a | 1265.23a | 758.26a | 97.86a | 1269.26a | 6.06a |
| | T1 | 6.30b | 20.79a | 6.24a | 0.79a | 1247.54a | 746.65ab | 97.44a | 1186.96a | 5.96a |
| | T2 | 4.02c | 20.64a | 6.19b | 0.78a | 1257.48a | 738.80b | 96.81a | 751.58b | 3.55b |
| | T3 | 3.27d | 20.27a | 6.12c | 0.73b | 1265.23a | 721.62c | 96.39a | 684.18b | 3.00b |
| Önemlilik | | * | - | * | - | * | - | - | - | - |

EK-11. Peletlerin fiziksel ve yakıt özelliklerinin ISO/TS17225-8 standardına göre değerlendirilmesi

| Hammadde | Pelet kodu | Ç | B | Nİ | Kİ | MD | YY | LHV | N | S |
|--------------------------|------------|---|---|----|----|----|----|-----|---|---|
| Sera domates sapı (D) | D-B0-T0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |
| | D-B0-T1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | D-B0-T2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | D-B0-T3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | D-B1-T0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |
| | D-B1-T1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |
| | D-B1-T2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | D-B1-T3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | D-B2-T0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ |
| | D-B2-T1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |
| | D-B2-T2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | D-B2-T3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | D-B3-T0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ |
| | D-B3-T1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |
| | D-B3-T2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| D-B3-T3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | |
| Zeytin budama artığı (Z) | Z-B0-T0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| | Z-B0-T1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| | Z-B0-T2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Z-B0-T3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Z-B1-T0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| | Z-B1-T1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| | Z-B1-T2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Z-B1-T3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Z-B2-T0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| | Z-B2-T1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Z-B2-T2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Z-B2-T3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Z-B3-T0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| | Z-B3-T1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Z-B3-T2 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Z-B3-T3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |

(✓: Uygun, ✗: Uygun değil, Ç: Pelet çapı, B: Pelet boyu, Nİ: Pelet nemi, Kİ: Kül içeriği, MD: Mekanik dayanıklılık indeksi, YY: Yığın yoğunluğu, LHV: Alt ısı değer, N: Azot, S: Kükürt)

EK-12. Artan buhar düzeylerinde üretilen sera domates sapı peletlerinin artan torefikasyon sıcaklıklarında torefikasyon verimlilik parametreleri

| Hammadde | Buhar düzeyi | Torefikasyon düzeyi | Kütle kaybı (%) | Kütle Verimi (%) | Enerji Verimi (%) | İyileştirme faktörü (-) |
|----------|--------------|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------------|
| Domates | B0 | T0 | | | | |
| | | T1 | 13.66 | 86.34 | 97.72 | 1.13 |
| | | T2 | 14.79 | 85.21 | 98.93 | 1.16 |
| | | T3 | 25.13 | 74.87 | 88.72 | 1.18 |
| | B1 | T0 | | | | |
| | | T1 | 10.80 | 89.20 | 97.83 | 1.10 |
| | | T2 | 19.15 | 80.85 | 95.88 | 1.19 |
| | | T3 | 24.47 | 75.53 | 90.59 | 1.20 |
| | B2 | T0 | | | | |
| | | T1 | 8.89 | 91.11 | 95.93 | 1.05 |
| | | T2 | 16.77 | 83.23 | 94.09 | 1.13 |
| | | T3 | 21.27 | 78.73 | 91.98 | 1.17 |
| | B3 | T0 | | | | |
| | | T1 | 5.84 | 94.16 | 93.71 | 1.00 |
| | | T2 | 17.22 | 82.78 | 92.11 | 1.11 |
| | | T3 | 20.49 | 79.51 | 90.56 | 1.14 |

EK-13. Artan buhar düzeylerinde üretilen zeytin budama artığı peletlerinin artan torefikasyon sıcaklıklarında torefikasyon verimlilik parametreleri

| Hammadde | Buhar düzeyi | Torefikasyon düzeyi | Kütle kaybı (%) | Kütle Verimi (%) | Enerji Verimi (%) | İyileştirme faktörü (-) |
|----------|--------------|---------------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------------|
| Zeytin | B0 | T0 | | | | |
| | | T1 | 6.75 | 93.25 | 98.35 | 1.05 |
| | | T2 | 16.56 | 83.44 | 96.78 | 1.16 |
| | | T3 | 19.02 | 80.98 | 95.83 | 1.18 |
| | B1 | T0 | | | | |
| | | T1 | 6.77 | 93.23 | 97.24 | 1.04 |
| | | T2 | 14.03 | 85.97 | 97.75 | 1.14 |
| | | T3 | 16.45 | 83.55 | 95.60 | 1.14 |
| | B2 | T0 | | | | |
| | | T1 | 9.71 | 90.29 | 97.19 | 1.08 |
| | | T2 | 14.46 | 85.54 | 91.62 | 1.07 |
| | | T3 | 18.03 | 81.97 | 90.31 | 1.10 |
| | B3 | T0 | | | | |
| | | T1 | 9.56 | 90.44 | 98.62 | 1.09 |
| | | T2 | 13.28 | 86.72 | 97.44 | 1.12 |
| | | T3 | 18.23 | 81.77 | 92.64 | 1.13 |

EK-14. Artan buhar düzeylerinde üretilen sera domates sapı artığı peletlerinin artan torefikasyon sıcaklıklarında yakıt değer indeksi ve net enerji yoğunluğu değerleri

| Hammadde | Buhar düzeyi | Torefikasyon düzeyi | Net enerji yoğunluğu (MJ/m ³) | Yakıt değeri indeksi (-) |
|-----------------------------|--------------|---------------------|---|--------------------------|
| Sera Domates Sapı Artıkları | B0 | T0 | 75.26 | 11.56 |
| | | T1 | 67.28 | 12.31 |
| | | T2 | 59.81 | 14.29 |
| | | T3 | 48.64 | 16.12 |
| | B1 | T0 | 74.19 | 12.89 |
| | | T1 | 69.40 | 13.16 |
| | | T2 | 61.26 | 13.98 |
| | | T3 | 50.26 | 15.84 |
| | B2 | T0 | 75.07 | 12.76 |
| | | T1 | 70.29 | 12.95 |
| | | T2 | 63.56 | 13.24 |
| | | T3 | 53.36 | 14.97 |
| | B3 | T0 | 73.46 | 11.49 |
| | | T1 | 72.26 | 13.08 |
| | | T2 | 64.53 | 14.26 |
| | | T3 | 53.64 | 16.08 |

EK-15. Artan buhar düzeylerinde üretilen sera domates sapı artığı peletlerinin artan torefikasyon sıcaklıklarında yakıt değeri indeksi ve net enerji yoğunluğu değerleri

| Hammadde | Buhar düzeyi | Torefikasyon düzeyi | Net enerji yoğunluğu (MJ/m ³) | Yakıt değeri indeksi (-) |
|-------------------------|--------------|---------------------|---|--------------------------|
| Zeytin Budama Artıkları | B0 | T0 | 81.16 | 9.15 |
| | | T1 | 73.16 | 11.12 |
| | | T2 | 64.02 | 13.45 |
| | | T3 | 55.87 | 16.21 |
| | B1 | T0 | 78.16 | 8.62 |
| | | T1 | 73.44 | 10.86 |
| | | T2 | 63.65 | 12.43 |
| | | T3 | 56.71 | 14.75 |
| | B2 | T0 | 79.46 | 7.45 |
| | | T1 | 72.95 | 10.96 |
| | | T2 | 64.97 | 11.46 |
| | | T3 | 58.89 | 15.03 |
| | B3 | T0 | 78.54 | 8.48 |
| | | T1 | 73.32 | 11.08 |
| | | T2 | 66.38 | 13.26 |
| | | T3 | 60.00 | 15.41 |







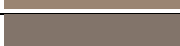





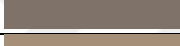


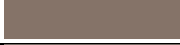
EK-16. Artan sıcak buhar düzeylerinde üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı artıkları peletlerinin kısa analiz(proximate) ve elementel analiz (ultimate) değerleri

| Ham madde | Buhar düzeyi | Torefikasyon düzeyi | Uçucu madde (% , kb) | Kül İçeriği (% , kb) | Sabit karbon (% , kb) | C (%) | H (%) | N (%) | S (%) | O (%) | LHV (MJ/kg) | HHV (MJ/kg) |
|-----------------------------|--------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|
| Sera Domates Sapı Artıkları | B0 | T0 | 75.26 | 11.56 | 13.18 | 40.08 | 5.59 | 1.69 | 0.31 | 40.77 | 15.90 | 17.12 |
| | | T1 | 67.28 | 12.31 | 20.41 | 48.33 | 5.33 | 1.72 | 0.30 | 32.01 | 18.21 | 19.37 |
| | | T2 | 59.81 | 14.29 | 25.90 | 50.04 | 5.17 | 1.75 | 0.30 | 28.45 | 18.75 | 19.87 |
| | B1 | T3 | 48.64 | 16.12 | 35.24 | 51.49 | 5.02 | 1.83 | 0.32 | 25.22 | 19.19 | 20.28 |
| | | T0 | 74.19 | 12.89 | 12.92 | 39.21 | 5.56 | 1.76 | 0.33 | 40.25 | 15.70 | 16.91 |
| | | T1 | 69.40 | 13.16 | 17.44 | 45.65 | 5.27 | 1.93 | 0.44 | 33.55 | 17.40 | 18.55 |
| | B2 | T2 | 61.26 | 13.98 | 24.76 | 50.90 | 5.05 | 2.02 | 0.39 | 27.65 | 18.95 | 20.06 |
| | | T3 | 50.26 | 15.84 | 33.90 | 51.77 | 5.00 | 2.16 | 0.38 | 24.85 | 19.19 | 20.29 |
| | | T0 | 75.07 | 12.76 | 12.17 | 38.94 | 5.40 | 1.35 | 0.26 | 41.29 | 15.85 | 17.03 |
| | B3 | T1 | 70.29 | 12.95 | 16.76 | 43.49 | 5.34 | 2.09 | 0.37 | 35.76 | 16.77 | 17.93 |
| | | T2 | 63.56 | 13.24 | 23.20 | 48.38 | 4.90 | 2.15 | 0.44 | 30.90 | 18.19 | 19.26 |
| | | T3 | 53.36 | 14.97 | 31.67 | 51.21 | 4.41 | 2.47 | 0.44 | 26.50 | 18.93 | 19.90 |
| | B3 | T0 | 73.46 | 11.49 | 15.05 | 42.43 | 5.78 | 1.49 | 0.30 | 38.51 | 16.42 | 17.68 |
| | | T1 | 72.26 | 13.08 | 14.66 | 42.09 | 5.67 | 1.61 | 0.28 | 37.26 | 16.36 | 17.60 |
| | | T2 | 64.53 | 14.26 | 21.21 | 49.48 | 5.05 | 1.78 | 0.39 | 29.05 | 18.57 | 19.68 |
| | | T3 | 53.64 | 16.08 | 30.28 | 51.75 | 4.38 | 2.05 | 0.41 | 25.33 | 19.18 | 20.14 |







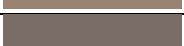








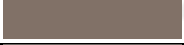
EK-17. Artan sıcak buhar düzeylerinde üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen zeytin budama artıkları peletlerinin kısa analiz (proximate) ve elemental analiz (ultimate) değerleri

| Ham madde | Buhar düzeyi | Torefikasyon düzeyi | Uçucu madde (% , kb) | Kül içeriği (% , kb) | Sabit karbon (% , kb) | C (%) | H (%) | N (%) | S (%) | O (%) | LHV (MJ/kg) | HHV (MJ/kg) |
|-------------------------|--------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|
| Zeytin Budama Artıkları | B0 | T0 | 81.16 | 9.15 | 9.69 | 41.48 | 6.10 | 0.66 | 0.00 | 42.61 | 16.19 | 17.52 |
| | | T1 | 73.16 | 11.12 | 15.72 | 44.68 | 6.03 | 0.66 | 0.00 | 37.51 | 17.16 | 18.47 |
| | | T2 | 64.02 | 13.45 | 22.53 | 50.27 | 5.82 | 0.68 | 0.00 | 29.78 | 19.05 | 20.32 |
| | B1 | T3 | 55.87 | 16.21 | 27.92 | 51.55 | 5.76 | 0.84 | 0.00 | 25.64 | 19.47 | 20.73 |
| | | T0 | 78.16 | 8.62 | 13.22 | 42.17 | 6.10 | 0.49 | 0.02 | 42.60 | 16.42 | 17.75 |
| | | T1 | 73.44 | 10.86 | 15.70 | 44.75 | 6.01 | 0.59 | 0.01 | 37.78 | 17.20 | 18.52 |
| | B2 | T2 | 63.65 | 12.43 | 23.92 | 49.86 | 5.87 | 0.67 | 0.01 | 31.16 | 18.90 | 20.19 |
| | | T3 | 56.71 | 14.75 | 28.54 | 51.06 | 4.65 | 0.78 | 0.00 | 28.76 | 19.30 | 20.31 |
| | | T0 | 79.46 | 7.45 | 13.09 | 45.73 | 5.90 | 0.55 | 0.02 | 40.35 | 17.56 | 18.84 |
| | B3 | T1 | 72.95 | 10.96 | 16.09 | 50.13 | 5.78 | 0.59 | 0.02 | 32.53 | 19.02 | 20.28 |
| | | T2 | 64.97 | 11.46 | 23.57 | 49.87 | 5.73 | 0.60 | 0.01 | 32.33 | 18.93 | 20.18 |
| | | T3 | 58.89 | 15.03 | 26.08 | 51.56 | 5.67 | 0.63 | 0.00 | 27.11 | 19.52 | 20.76 |
| | B3 | T0 | 78.54 | 8.48 | 12.98 | 43.72 | 6.13 | 0.46 | 0.01 | 41.20 | 16.87 | 18.21 |
| | | T1 | 73.32 | 11.08 | 15.60 | 48.78 | 6.05 | 0.55 | 0.01 | 33.52 | 18.53 | 19.86 |
| | | T2 | 66.38 | 13.26 | 20.36 | 50.52 | 6.06 | 0.66 | 0.00 | 29.50 | 19.14 | 20.46 |
| | | T3 | 60.00 | 15.41 | 24.59 | 51.28 | 5.76 | 0.85 | 0.00 | 26.70 | 19.37 | 20.63 |

EK-18. Sera domates sapı peletlerinin renk parametreleri ve ölçülen renk parametrelerine karşılık gelen renk görselleri

| Pelet | Renk görseli | L | a | b | ΔL | Δa | Δb | ΔE |
|---------|---|-------|------|-------|------------|------------|------------|------------|
| D-B0-T0 |  | 63.35 | 6.11 | 16.19 | - | - | - | - |
| D-B0-T1 |  | 50.82 | 5.59 | 10.05 | -12.52 | -0.53 | -6.14 | 13.96 |
| D-B0-T2 |  | 50.6 | 5.33 | 8.62 | -12.75 | -0.79 | -7.56 | 14.84 |
| D-B0-T3 |  | 45.16 | 2.43 | 3.49 | -18.19 | -3.69 | -12.69 | 22.48 |
| D-B1-T0 |  | 63.53 | 6.19 | 16.56 | - | - | - | - |
| D-B1-T1 |  | 57.24 | 6.38 | 12.56 | -6.29 | 0.19 | -4.00 | 7.46 |
| D-B1-T2 |  | 49.87 | 4.26 | 7.66 | -13.65 | -1.93 | -8.90 | 16.41 |
| D-B1-T3 |  | 47.33 | 2.8 | 4.84 | -16.20 | -3.39 | -11.72 | 20.28 |
| D-B2-T0 |  | 63.71 | 6.01 | 16.75 | - | - | - | - |
| D-B2-T1 |  | 55.24 | 7.27 | 13.18 | -8.47 | 1.26 | -3.57 | 9.28 |
| D-B2-T2 |  | 52.29 | 5.94 | 10.17 | -11.42 | -0.07 | -6.58 | 13.18 |
| D-B2-T3 |  | 48.83 | 4.47 | 7.02 | -14.88 | -1.54 | -9.73 | 17.85 |
| D-B3-T0 |  | 61.49 | 6.15 | 14.88 | - | - | - | - |
| D-B3-T1 |  | 55.78 | 7.82 | 13.74 | -5.71 | 1.67 | -1.14 | 6.06 |
| D-B3-T2 |  | 50.49 | 5.59 | 9.05 | -11.00 | -0.56 | -5.82 | 12.46 |
| D-B3-T3 |  | 46.85 | 3.55 | 5.29 | -14.64 | -2.60 | -9.59 | 17.69 |

EK-19. Zeytin budama artıkları peletlerinin renk parametreleri ve ölçülen renk parametrelerine karşılık gelen renk görselleri

| Pelet | Renk görseli | L | a | b | ΔL | Δa | Δb | ΔE |
|---------|---|-------|------|-------|------------|------------|------------|------------|
| Z-B0-T0 |  | 59.94 | 6.14 | 13.54 | - | - | - | - |
| Z-B0-T1 |  | 57.51 | 7.50 | 14.38 | 2.91 | -2.43 | 1.36 | 0.84 |
| Z-B0-T2 |  | 49.38 | 4.65 | 8.22 | 11.92 | -10.56 | -1.49 | -5.32 |
| Z-B0-T3 |  | 44.95 | 2.77 | 3.93 | 18.12 | -14.99 | -3.37 | -9.61 |
| Z-B1-T0 |  | 60.24 | 6.74 | 14.65 | - | - | - | - |
| Z-B1-T1 |  | 56.01 | 7.01 | 12.68 | 4.68 | -4.23 | 0.27 | -1.97 |
| Z-B1-T2 |  | 46.99 | 3.62 | 5.88 | 16.19 | -13.25 | -3.12 | -8.77 |
| Z-B1-T3 |  | 43.80 | 2.04 | 3.12 | 20.63 | -16.44 | -4.70 | -11.53 |
| Z-B2-T0 |  | 55.72 | 6.29 | 12.34 | - | - | - | - |
| Z-B2-T1 |  | 49.72 | 4.69 | 8.43 | 7.34 | -6.00 | -1.60 | -3.91 |
| Z-B2-T2 |  | 50.02 | 4.86 | 8.73 | 6.90 | -5.70 | -1.43 | -3.62 |
| Z-B2-T3 |  | 45.73 | 2.87 | 4.55 | 13.13 | -9.99 | -3.42 | -7.80 |
| Z-B3-T0 |  | 60.19 | 6.77 | 13.85 | - | - | - | - |
| Z-B3-T1 |  | 51.33 | 5.12 | 9.89 | 9.85 | -8.86 | -1.65 | -3.96 |
| Z-B3-T2 |  | 49.38 | 4.54 | 7.96 | 12.51 | -10.81 | -2.23 | -5.89 |
| Z-B3-T3 |  | 44.54 | 2.41 | 3.76 | 19.13 | -15.65 | -4.36 | -10.09 |

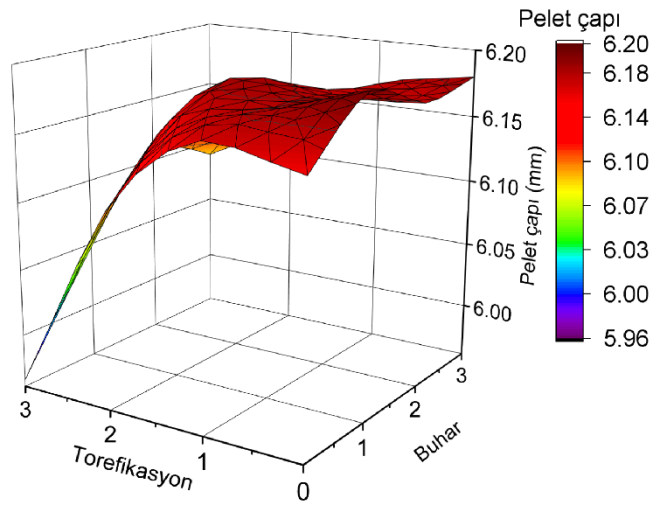
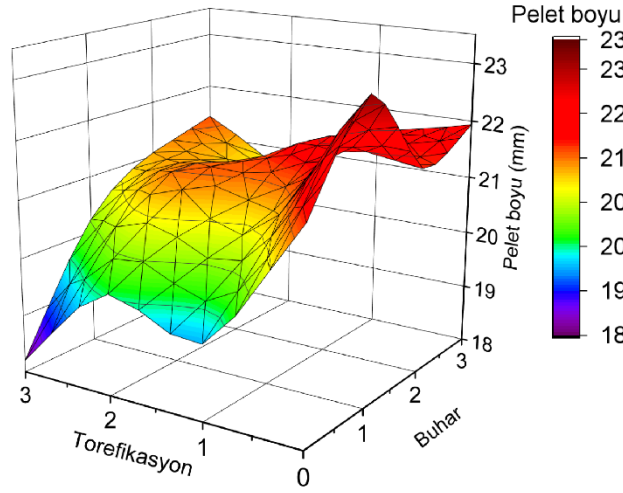
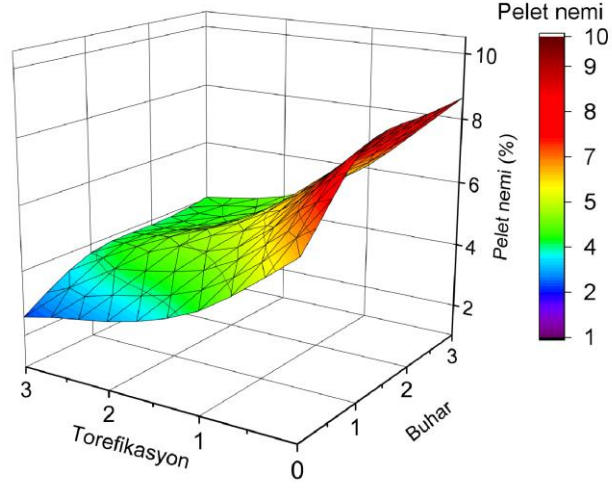
EK-20. Artan düzeylerde torefiye edilen sera domates sapı artıkları peletlerinin renk parametreleriyle kısa/elementel analiz içerikleri ve torefikasyon verimliliği değerleri arasındaki ilişki

| (L, U/P) | D-B0 _{T1,T2,T3} | | D-B1 _{T1,T2,T3} | | D-B2 _{T1,T2,T3} | | D-B3 _{T1,T2,T3} | |
|----------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² |
| C | -0.6517L + 81.69 | 0.97 | -0.78L + 89.40 | 0.98 | -0.83L + 91.15 | 0.95 | -0.71L + 84.37 | 0.84 |
| H | 0.03L + 3.69 | 0.92 | 0.03L + 3.34 | 0.98 | 0.06L + 1.62 | 0.73 | 0.09L + 0.13 | 0.88 |
| N | -0.01L + 2.10 | 0.73 | -0.02L + 3.18 | 0.95 | -0.07L + 6.07 | 0.98 | -0.04L + 3.70 | 0.92 |
| S | -0.00L + 0.32 | 0.03 | -0.00L + 0.50 | 0.11 | -0.01L + 1.09 | 0.95 | -0.01L + 0.82 | 0.76 |
| O | 0.85L - 13.08 | 0.96 | 0.93L - 18.96 | 1.00 | 0.98L - 20.18 | 0.95 | 0.96L - 18.78 | 0.92 |
| Kül | -0.22L + 25.30 | 0.70 | -0.16L + 22.53 | 0.75 | -0.12L + 20.25 | 0.60 | -0.30L + 29.79 | 0.97 |
| Uçucu | 1.33L - 7.20 | 0.82 | 1.35L - 9.60 | 0.89 | 1.36L - 9.09 | 0.84 | 1.31L - 4.49 | 0.84 |
| SBT C | -1.11L + 81.90 | 0.84 | -1.19L + 87.08 | 0.91 | -1.23L + 88.84 | 0.86 | -1.01L + 74.69 | 0.79 |
| HHV | -0.18L + 28.61 | 0.97 | -0.21L + 30.49 | 0.99 | -0.19L + 29.25 | 0.92 | -0.19L + 28.97 | 0.84 |
| (a, U/P) | D-B0 _{T1,T2,T3} | | D-B1 _{T1,T2,T3} | | D-B2 _{T1,T2,T3} | | D-B3 _{T1,T2,T3} | |
| | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² |
| C | -2.09a + 57.65 | 0.46 | -2.83a + 60.78 | 0.69 | -2.93a + 62.86 | 0.38 | -2.45a + 60.58 | 0.77 |
| H | 0.12a + 4.68 | 0.69 | 0.12a + 4.61 | 0.69 | 0.34a + 2.98 | 0.73 | 0.33a + 3.34 | 0.79 |
| N | -0.04a + 1.92 | 0.95 | -0.09a + 2.40 | 0.79 | -0.16a + 2.94 | 0.14 | -0.11a + 2.39 | 0.68 |
| S | -0.00a + 0.33 | 0.58 | 0.00a + 0.37 | 0.01 | -0.03a + 0.54 | 0.14 | -0.03a + 0.53 | 0.79 |
| O | 3.14a + 16.35 | 0.60 | 3.54a + 14.18 | 0.78 | 3.52a + 12.76 | 0.40 | 3.07a + 14.80 | 0.72 |
| Kül | -1.13a + 19.07 | 0.83 | -0.75a + 17.66 | 0.92 | -0.75a + 17.92 | 0.72 | -0.81a + 18.38 | 0.54 |
| Uçucu | 6.31a + 32.06 | 0.85 | 5.97a + 34.50 | 0.94 | 6.33a + 28.09 | 0.59 | 4.66a + 39.05 | 0.81 |
| SBT C | -5.18a + 48.87 | 0.85 | -5.21a + 47.84 | 0.93 | -5.58a + 53.99 | 0.57 | -3.85a + 42.57 | 0.87 |
| HHV | -0.58a + 21.99 | 0.47 | -0.78a + 22.77 | 0.71 | -0.74a + 22.92 | 0.43 | -0.65a + 22.51 | 0.74 |
| (b, U/P) | D-B0 _{T1,T2,T3} | | D-B1 _{T1,T2,T3} | | D-B2 _{T1,T2,T3} | | D-B3 _{T1,T2,T3} | |
| | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² |
| C | -0.92b + 56.31 | 0.89 | -1.09b + 58.20 | 0.95 | -1.30b + 60.76 | 0.99 | -1.09b + 58.10 | 0.96 |
| H | 0.05b + 4.84 | 0.97 | 0.05b + 4.72 | 0.96 | 0.10b + 3.78 | 0.90 | 0.15b + 3.66 | 0.99 |
| N | -0.01b + 1.85 | 0.90 | -0.03b + 2.30 | 0.97 | -0.11b + 3.28 | 0.89 | -0.05b + 2.31 | 0.98 |
| S | -0.00b + 0.31 | 0.14 | -0.00b + 0.41 | 0.09 | -0.02b + 0.60 | 0.88 | -0.01b + 0.49 | 0.90 |
| O | 1.25b + 19.60 | 0.95 | 1.31b + 17.98 | 0.99 | 1.53b + 15.60 | 1.00 | 1.43b + 17.16 | 0.99 |
| Kül | -0.37b + 17.09 | 0.87 | -0.23b + 16.38 | 0.82 | -0.21b + 15.98 | 0.76 | -0.42b + 18.29 | 0.94 |
| Uçucu | 2.12b + 42.43 | 0.96 | 1.95b + 43.45 | 0.94 | 2.22b + 39.43 | 0.96 | 2.04b + 44.11 | 0.97 |
| SBT C | -1.75b + 40.47 | 0.97 | -1.72b + 40.17 | 0.95 | -2.01b + 44.59 | 0.97 | -1.61b + 37.61 | 0.95 |
| HHV | -0.25b + 21.60 | 0.89 | -0.30b + 22.02 | 0.96 | -0.31b + 22.16 | 0.98 | -0.29b + 21.89 | 0.94 |
| (AE, TV) | D-B0 _{T1,T2,T3} | | D-B1 _{T1,T2,T3} | | D-B2 _{T1,T2,T3} | | D-B3 _{T1,T2,T3} | |
| | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² |
| KK | 1.35ΔE - 5.20 | 1.00 | 1.04ΔE + 2.79 | 0.99 | 1.43ΔE - 3.56 | 0.96 | 1.28ΔE - 0.92 | 0.94 |
| KV | -1.35ΔE + 105.20 | 1.00 | -1.04ΔE + 97.21 | 0.99 | -1.43ΔE + 103.56 | 0.96 | -1.28ΔE + 100.92 | 0.94 |
| EV | -1.17ΔE + 115.06 | 0.96 | -0.50ΔE + 102.18 | 0.78 | -0.46ΔE + 100.19 | 1.00 | -0.27ΔE + 95.39 | 1.00 |
| İF | 0.00ΔE + 1.08 | 0.73 | 0.01ΔE + 1.04 | 0.96 | 0.01ΔE + 0.93 | 0.94 | 0.01ΔE + 0.94 | 0.93 |

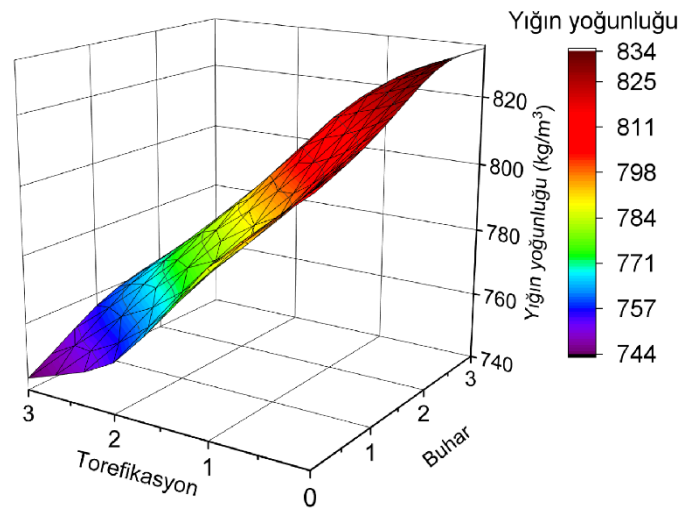
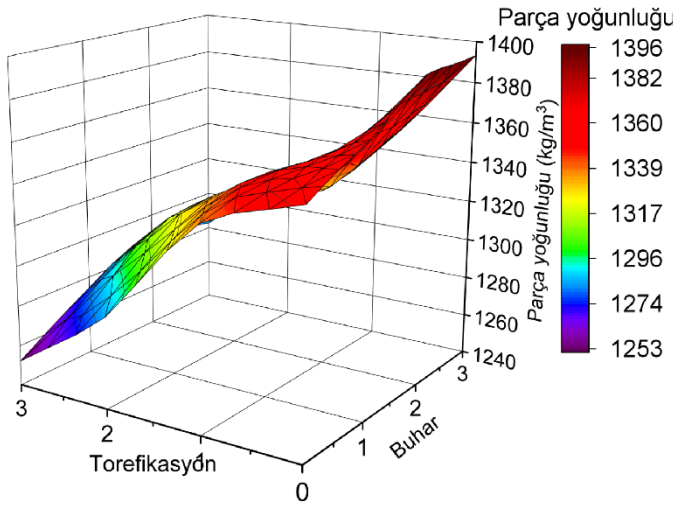
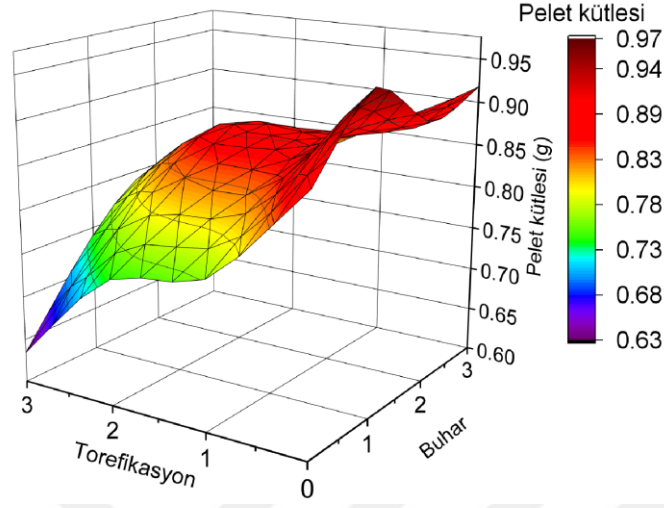
EK-21. Artan düzeylerde torefiye edilen zeytin budama artıkları peletlerinin renk parametreleriyle kısa/elementel analiz içerikleri ve torefikasyon verimliliği değerleri arasındaki ilişki

| (L, U/P) | Z-B0 _{T1,T2,T3} | | Z-B1 _{T1,T2,T3} | | Z-B2 _{T1,T2,T3} | | Z-B3 _{T1,T2,T3} | |
|----------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² |
| C | -0.66L + 82.16 | 0.96 | -0.55L + 75.32 | 1.00 | -0.60L + 79.41 | 0.96 | -0.51L + 74.64 | 0.95 |
| H | 0.02L + 4.70 | 0.99 | 0.07L + 2.05 | 0.62 | 0.02L + 4.61 | 0.94 | 0.02L + 4.93 | 0.69 |
| N | -0.01L + 1.26 | 0.68 | -0.02L + 1.44 | 0.94 | -0.01L + 0.99 | 0.98 | -0.02L + 1.85 | 0.86 |
| O | -0.43L + 35.19 | 0.97 | -0.33L + 28.55 | 0.94 | -0.75L + 48.70 | 0.98 | -0.44L + 34.78 | 0.95 |
| Kül | 1.55L - 13.46 | 0.97 | 1.25L + 3.35 | 0.98 | 2.01L - 31.91 | 0.84 | 1.17L + 9.29 | 0.90 |
| Uçucu | -1.12L + 78.27 | 0.97 | -0.92L + 68.10 | 0.98 | -1.26L + 83.20 | 0.72 | -0.73L + 55.93 | 0.86 |
| SBT C | -0.21L + 30.58 | 0.97 | -0.16L + 27.64 | 0.98 | -0.20L + 29.91 | 0.97 | -0.16L + 28.19 | 0.94 |
| HHV | -0.66L + 82.16 | 0.96 | -0.55L + 75.32 | 1.00 | -0.60L + 79.41 | 0.96 | -0.51L + 74.64 | 0.95 |
| (a, U/P) | Z-B0 _{T1,T2,T3} | | Z-B1 _{T1,T2,T3} | | Z-B2 _{T1,T2,T3} | | Z-B3 _{T1,T2,T3} | |
| | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² |
| C | -1.89a + 56.95 | 0.66 | -1.64a + 54.91 | 0.89 | -1.65a + 57.03 | 0.85 | -1.69a + 56.55 | 0.80 |
| H | 0.07a + 5.56 | 0.76 | 0.24a + 4.51 | 0.71 | 0.06a + 5.47 | 0.87 | 0.09a + 5.60 | 0.88 |
| N | -0.04a + 0.91 | 0.76 | -0.05a + 0.86 | 0.85 | -0.02a + 0.70 | 0.94 | -0.09a + 1.06 | 0.97 |
| O | -1.28a + 19.23 | 0.73 | -0.97a + 16.37 | 0.83 | -2.19a + 21.47 | 0.98 | -1.61a + 19.65 | 0.96 |
| Kül | 4.51a + 44.81 | 0.70 | 3.86a + 49.28 | 0.94 | 5.84a + 41.76 | 0.83 | 4.37a + 48.95 | 0.95 |
| Uçucu | -3.23a + 35.96 | 0.68 | -2.89a + 34.35 | 0.97 | -3.65a + 36.77 | 0.70 | -2.76a + 31.40 | 0.94 |
| SBT C | -0.62a + 22.50 | 0.67 | -0.48a + 21.54 | 0.87 | -0.54a + 22.56 | 0.86 | -0.54a + 22.34 | 0.78 |
| HHV | -1.89a + 56.95 | 0.66 | -1.64a + 54.91 | 0.89 | -1.65a + 57.03 | 0.85 | -1.69a + 56.55 | 0.80 |
| (b, U/P) | Z-B0 _{T1,T2,T3} | | Z-B1 _{T1,T2,T3} | | Z-B2 _{T1,T2,T3} | | Z-B3 _{T1,T2,T3} | |
| | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² |
| C | -0.88b + 55.81 | 0.83 | -0.76b + 53.88 | 0.98 | -0.74b + 55.64 | 0.89 | -0.75b + 55.22 | 0.85 |
| H | 0.03b + 5.61 | 0.90 | 0.10b + 4.74 | 0.66 | 0.03b + 5.52 | 0.90 | 0.04b + 5.69 | 0.82 |
| N | -0.02b + 0.87 | 0.78 | -0.02b + 0.83 | 0.93 | -0.01b + 0.68 | 0.96 | -0.04b + 0.98 | 0.97 |
| O | -0.59b + 18.36 | 0.89 | -0.45b + 15.78 | 0.92 | -0.97b + 19.47 | 0.99 | -0.70b + 18.28 | 0.98 |
| Kül | 2.09b + 47.62 | 0.87 | 1.75b + 52.06 | 0.99 | 2.59b + 46.98 | 0.84 | 1.90b + 52.71 | 0.97 |
| Uçucu | -1.50b + 34.01 | 0.85 | -1.30b + 32.15 | 1.00 | -1.63b + 33.55 | 0.72 | -1.20b + 29.01 | 0.96 |
| SBT C | -0.28b + 22.11 | 0.84 | -0.23b + 21.25 | 0.96 | -0.24b + 22.10 | 0.89 | -0.24b + 21.92 | 0.84 |
| HHV | -0.88b + 55.81 | 0.83 | -0.76b + 53.88 | 0.98 | -0.74b + 55.64 | 0.89 | -0.75b + 55.22 | 0.85 |
| (AE, TV) | Z-B0 _{T1,T2,T3} | | Z-B1 _{T1,T2,T3} | | Z-B2 _{T1,T2,T3} | | Z-B3 _{T1,T2,T3} | |
| | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² | Regresyon eşitliği | R ² |
| KK | y = 0.83x + 5.03 | 0.95 | y = 0.61x + 3.96 | 1.00 | y = 0.94x + 5.47 | 0.62 | y = 0.90x + 1.26 | 0.97 |
| KV | y = -0.71x + 89.92 | 0.74 | y = -0.83x + 93.35 | 0.98 | y = -1.33x + 96.46 | 0.54 | y = -1.37x + 104.45 | 0.73 |
| EV | y = -0.54x + 101.05 | 0.55 | y = -0.40x + 100.26 | 0.76 | y = -0.49x + 98.43 | 0.73 | y = -0.32x + 96.54 | 0.94 |
| İF | y = 0.00x + 1.12 | 1.00 | y = 0.01x + 1.07 | 0.97 | y = 0.01x + 1.00 | 0.51 | y = 0.01x + 0.90 | 0.72 |

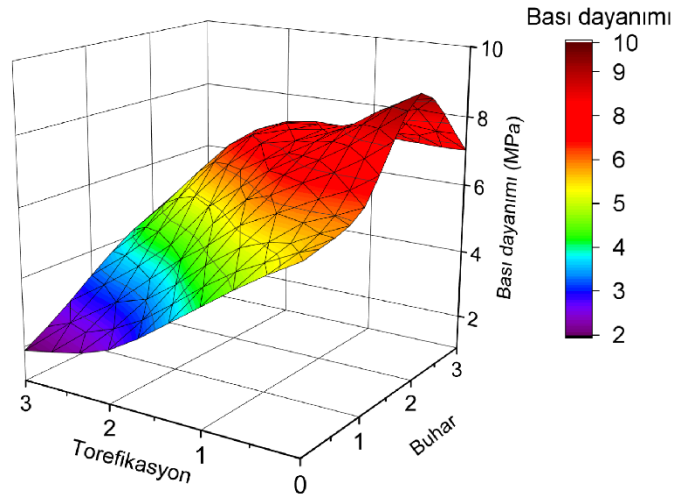
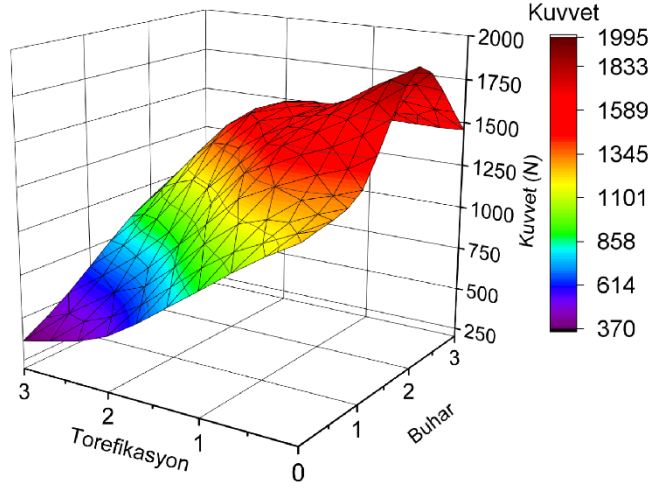
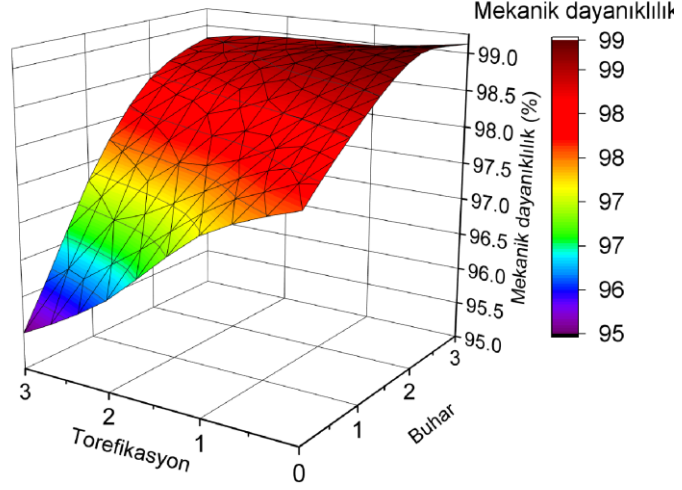
EK-22. Sera domates sapı peletlerinde pelet nemi, pelet boyu ve pelet çapı değerlerinin değişken buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyi koşullarında 3B grafik üzerinde gösterimi



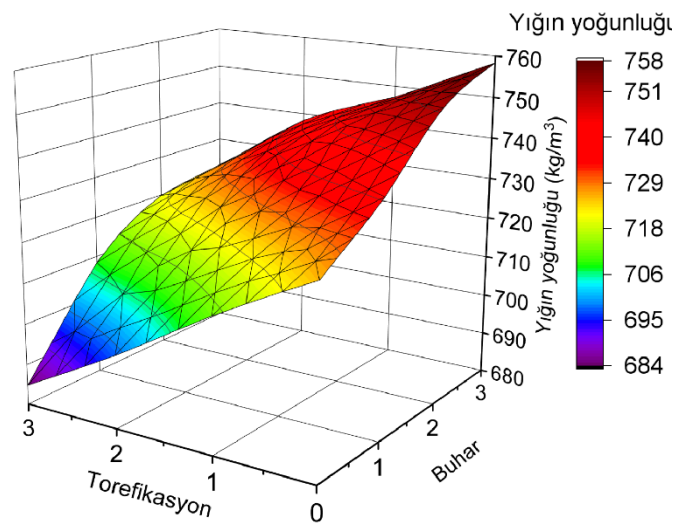
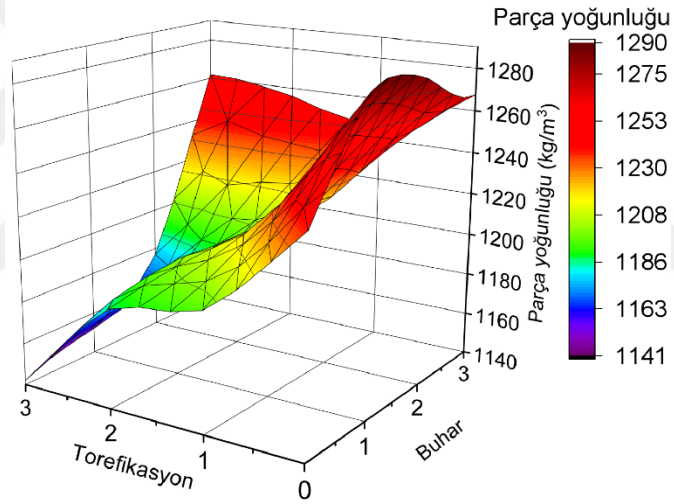
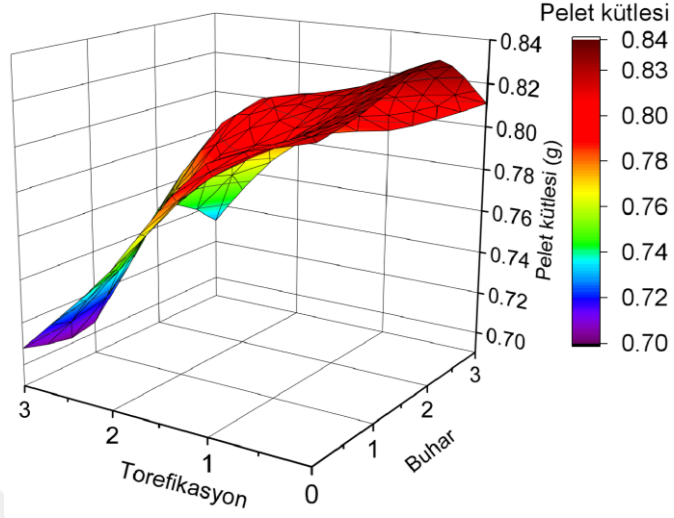
EK-23. Sera domates sapı peletlerinde pelet kütlesi, pelet parça yoğunluğu ve pelet yığın yoğunluğu değerlerinin değişken buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyi koşullarında 3B grafik üzerinde gösterimi



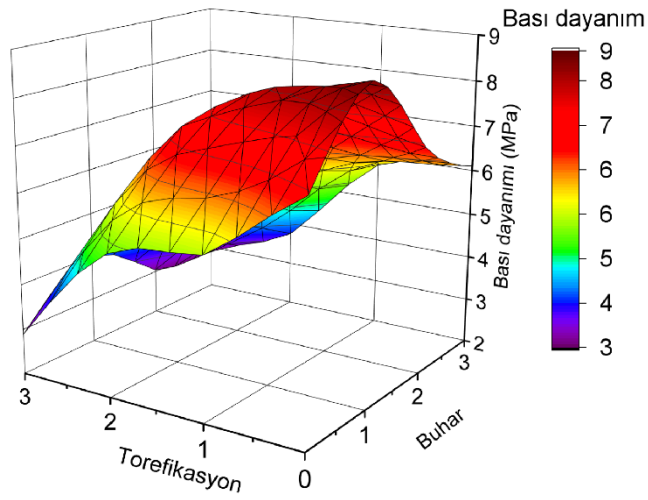
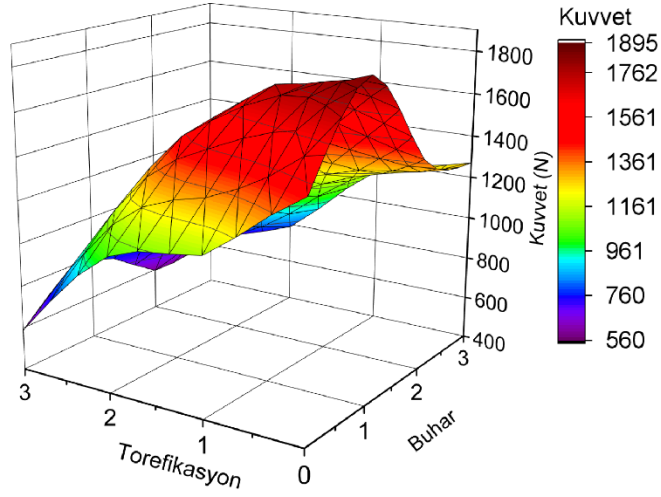
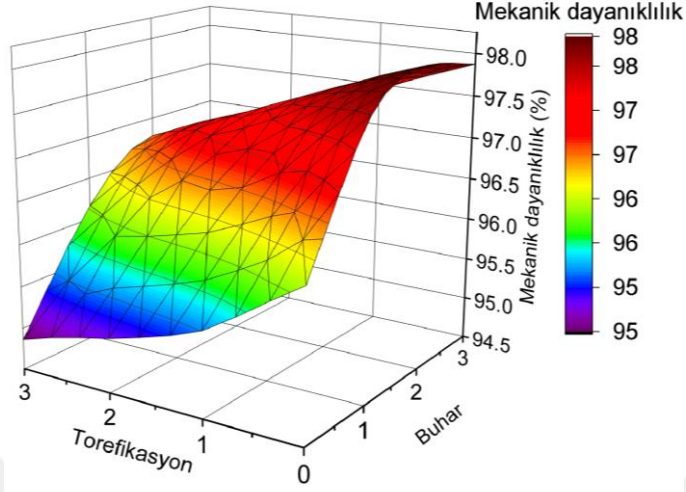
EK-24. Sera domates sapı peletlerinde mekanik dayanıklılık indeksi, maksimum kırılma kuvveti ve bası dayanımı değerlerinin değişken buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyi koşullarında 3B grafik üzerinde gösterimi



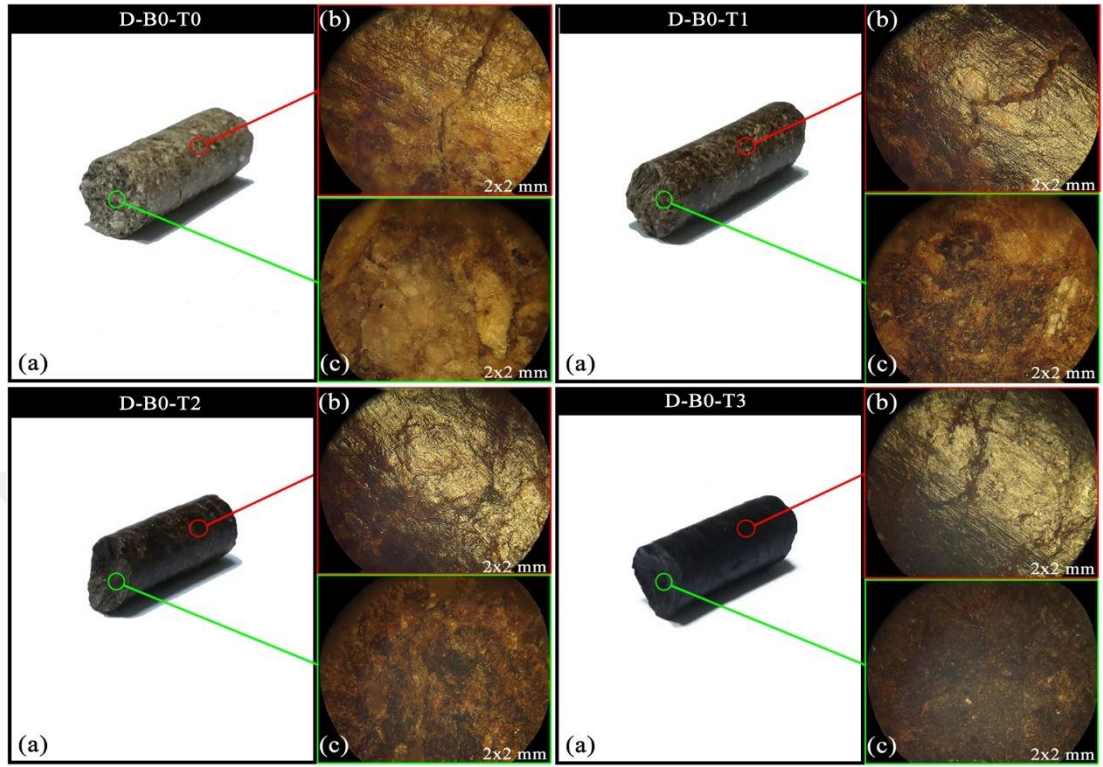
EK-26. Zeytin budama artığı peletlerinde pelet kütlesi, pelet parça yoğunluğu ve pelet yığın yoğunluğu değerlerinin değişken buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyi koşullarında 3B grafik üzerinde gösterimi



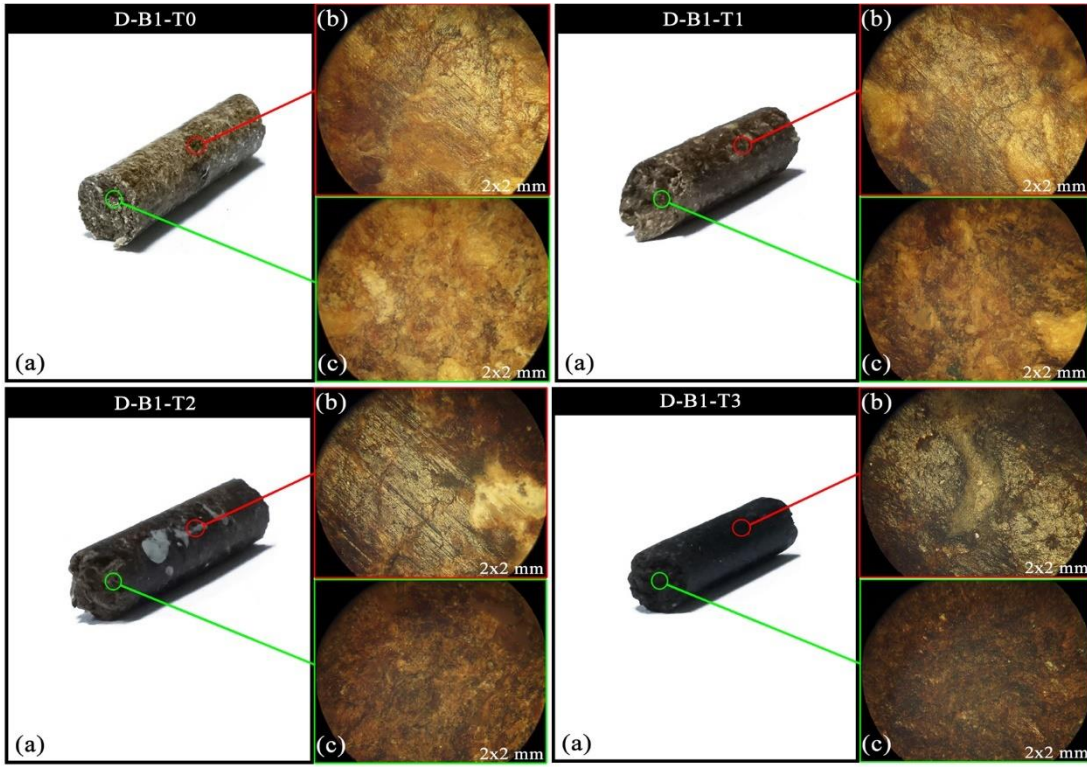
EK-27. Zeytin budama artığı peletlerinde mekanik dayanıklılık indeksi, maksimum kırılma kuvveti ve basınç dayanımı değerlerinin değişken buhar düzeyi ve torefikasyon düzeyi koşullarında 3B grafik üzerinde gösterimi



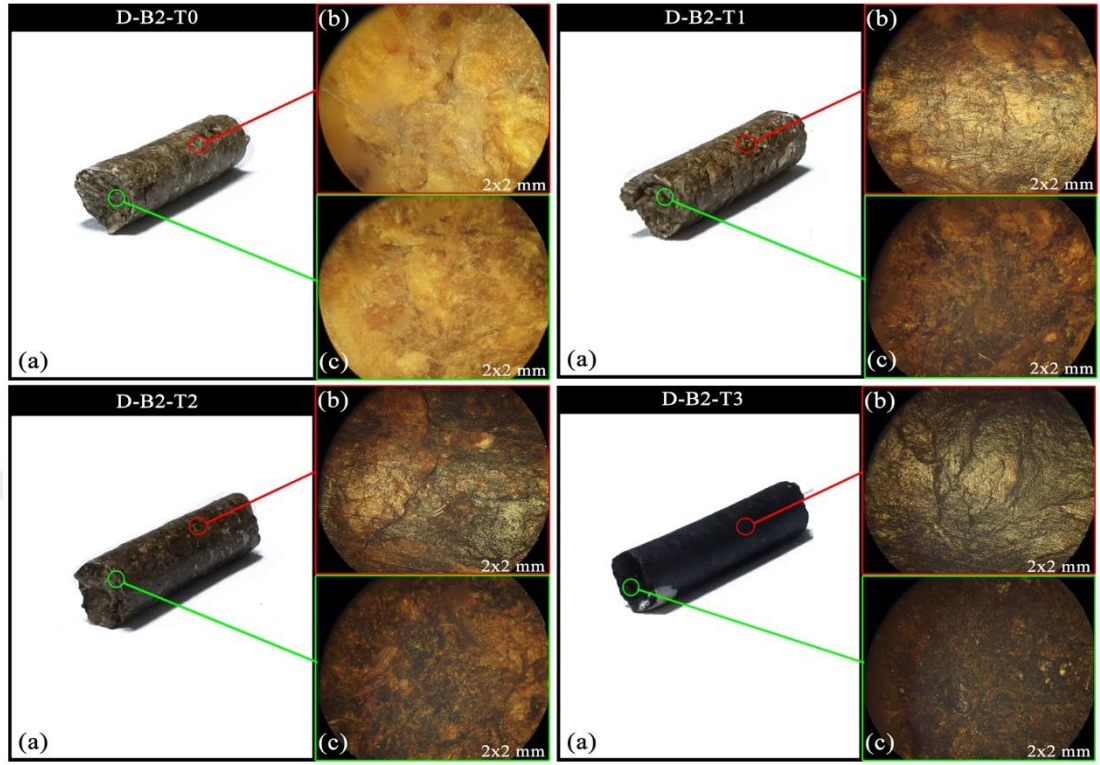
EK-28. Buharsız üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı peletlerinin a) genel, b) boy dış yüzeyi x100 ve c) çap iç yüzeyinin x100 görünümü



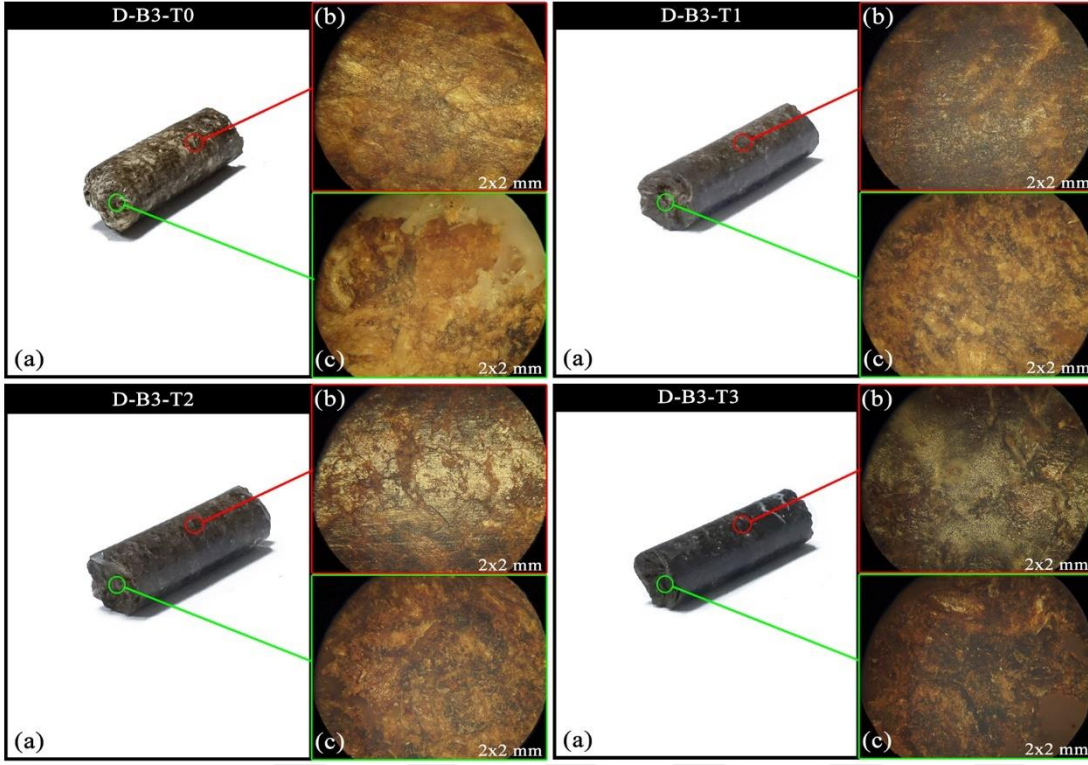
EK-29. Birinci düzey buharla üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı peletlerinin a) genel, b) boy dış yüzeyi x100 ve c) çap iç yüzeyinin x100 görünümü



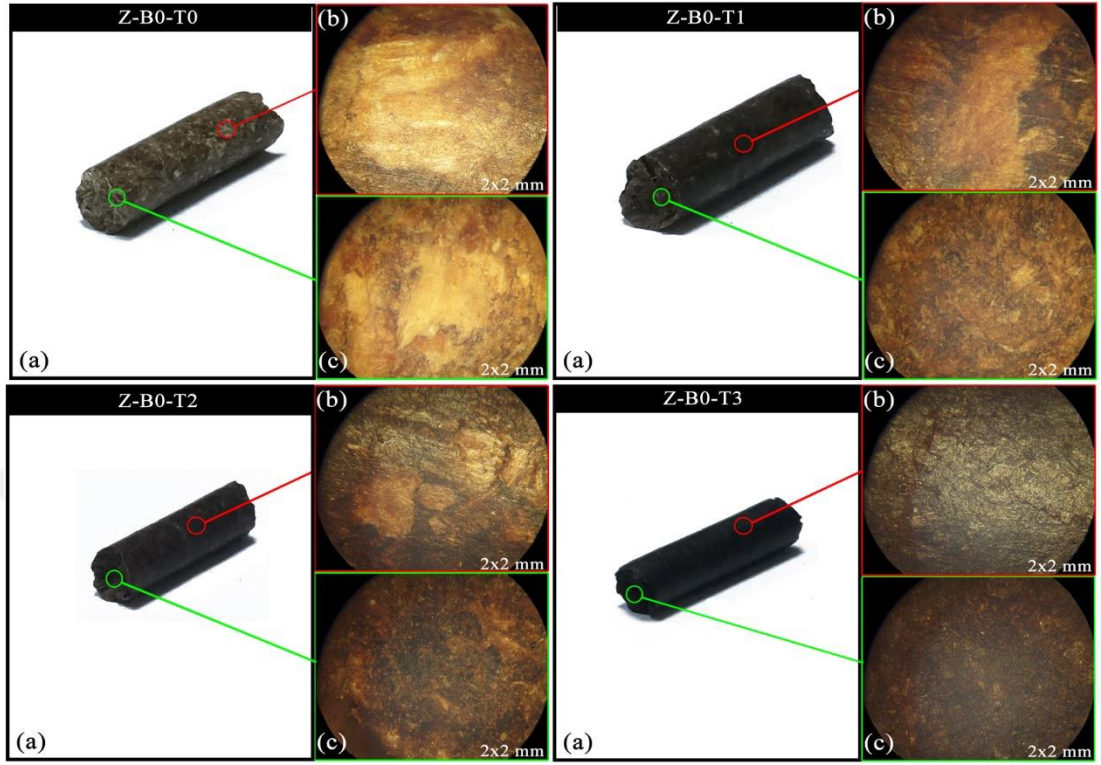
EK-30. İkinci düzey buharla üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı peletlerinin a) genel, b) boy dış yüzeyi x100 ve c) çap iç yüzeyinin x100 görünümü



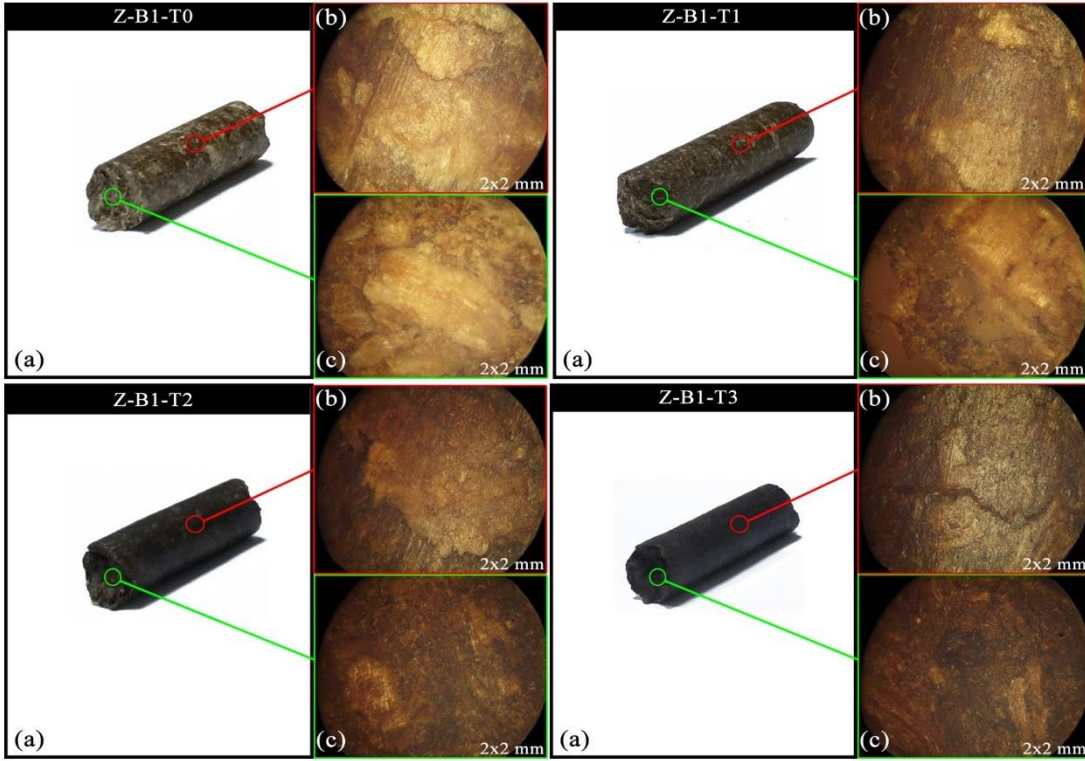
EK-31. Üçüncü düzey buharla üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen sera domates sapı peletlerinin a) genel, b) boy dış yüzeyi x100 ve c) çap iç yüzeyinin x100 görünümü



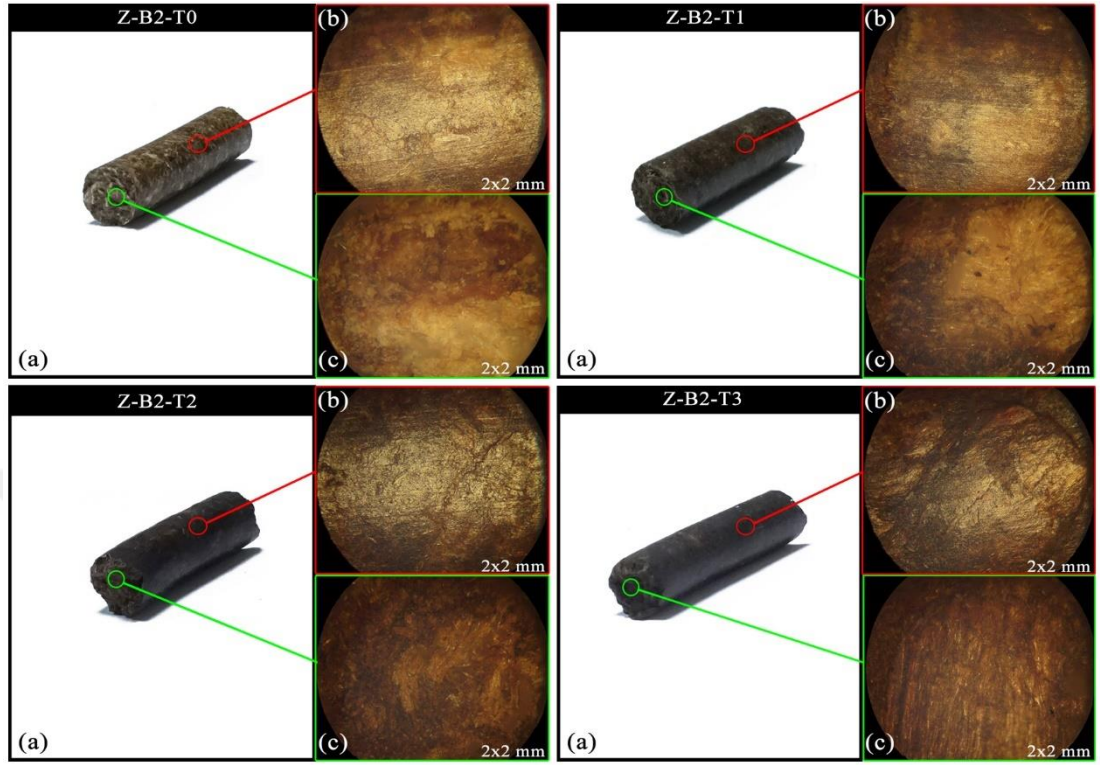
EK-32. Buharsız üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen zeytin budama artığı peletlerinin a) genel, b) boy dış yüzeyi x100 ve c) çap iç yüzeyinin x100 görünümü



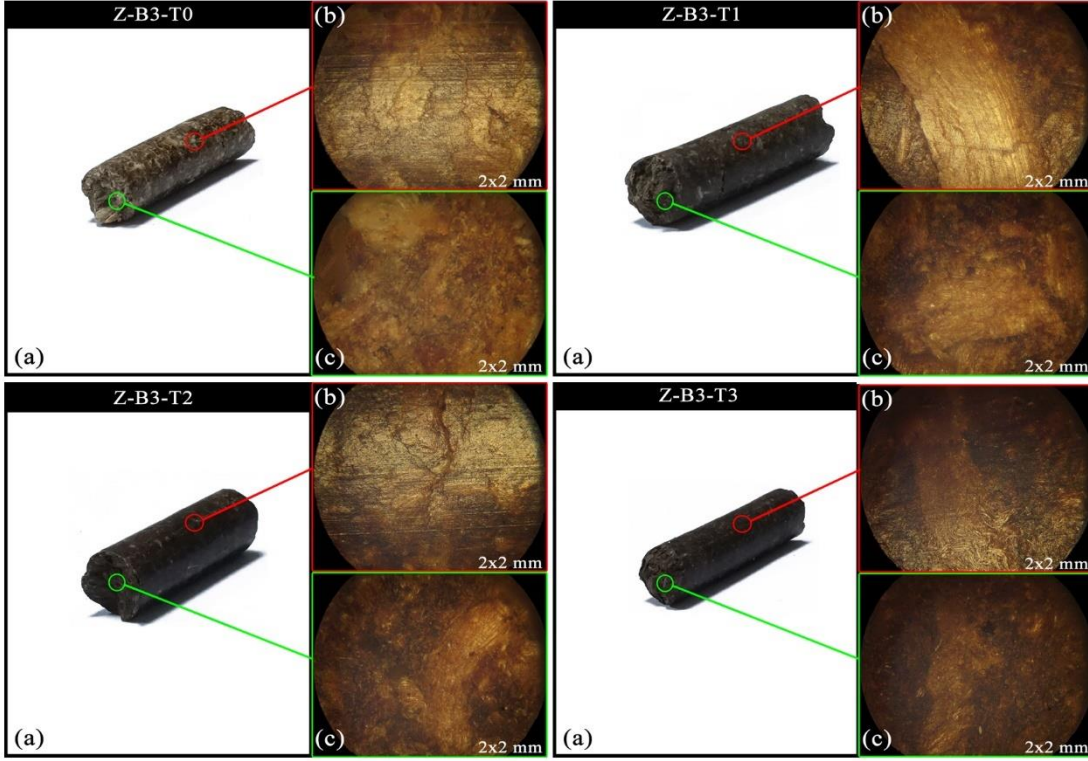
EK-33. Birinci düzey buharla üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen zeytin budama artığı peletlerinin a) genel, b) boy dış yüzeyi x100 ve c) çap iç yüzeyinin x100 görünümü



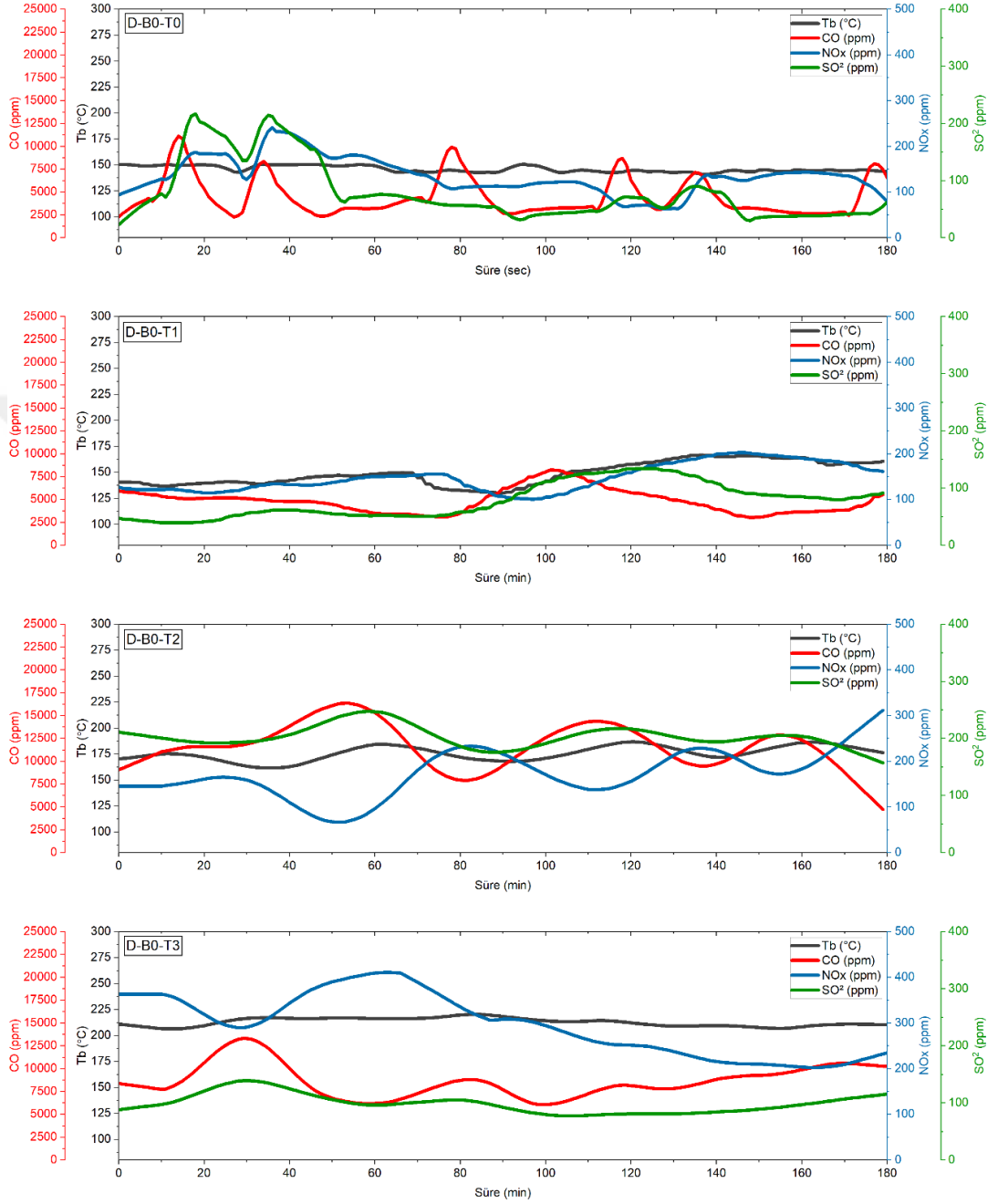
EK-34. İkinci düzey buharla üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen zeytin budama artığı peletlerinin a) genel, b) boy dış yüzeyi x100 ve c) çap iç yüzeyinin x100 görünümü



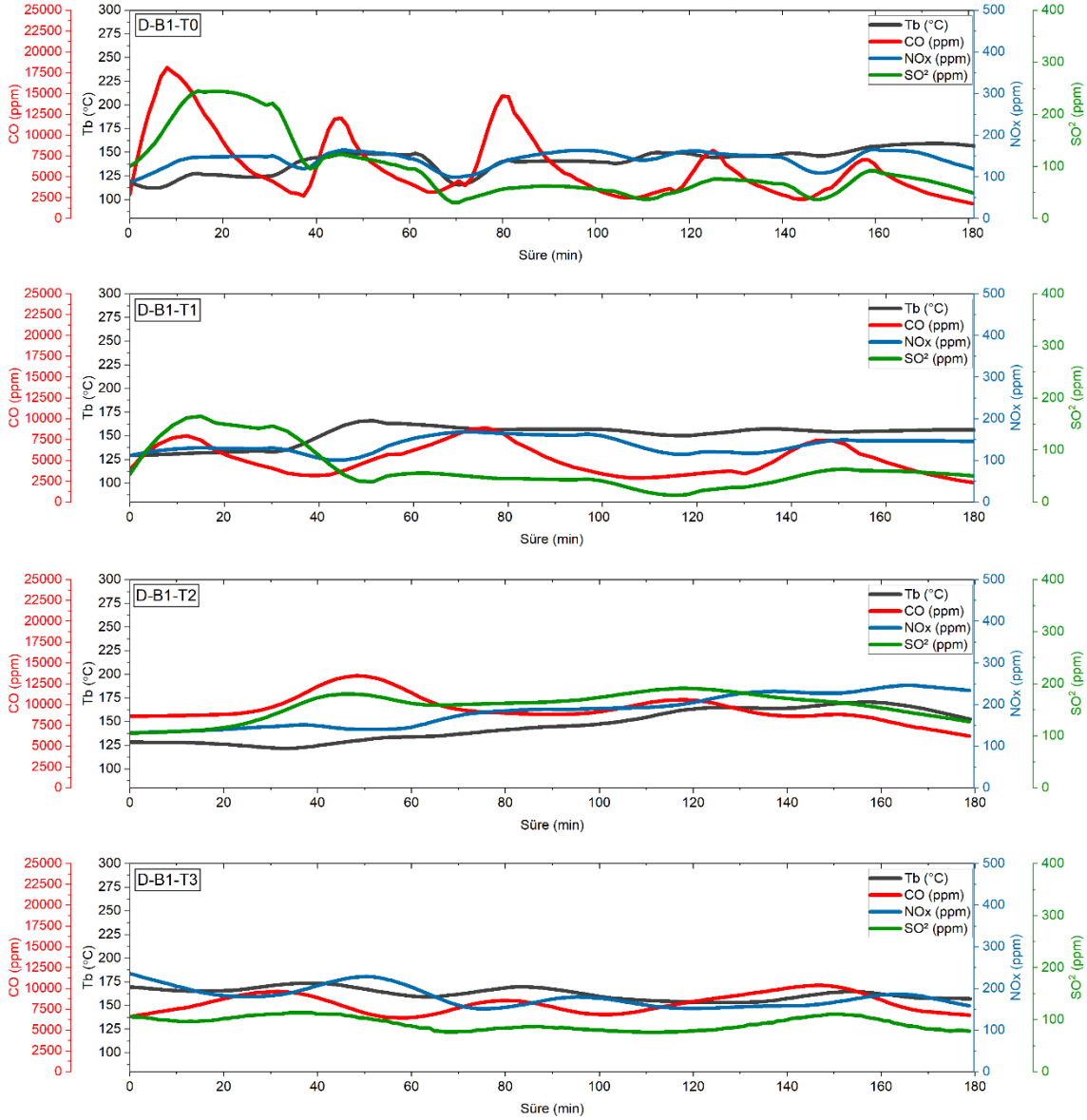
EK-35. Üçüncü düzey buharla üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen zeytin budama artığı peletlerinin a) genel, b) boy dış yüzeyi x100 ve c) çap iç yüzeyinin x100 görünümü



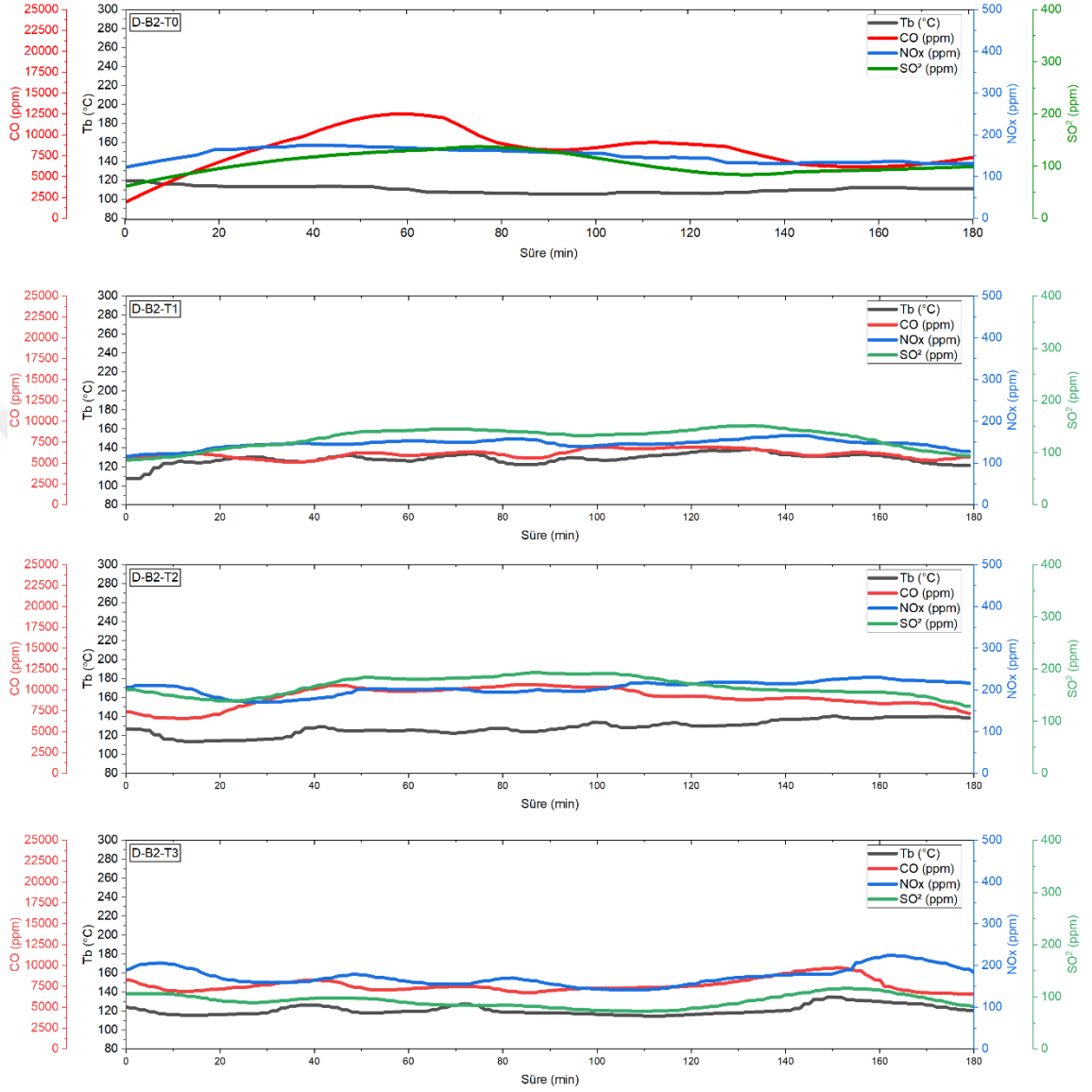
EK-36. Buharsız (B0) üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen (T0, T1, T2, T3) sera domates sapı peletlerinin yanma süreci boyunca ölçülen baca gazı sıcaklığı (T_b), Karbonmonoksit (CO), Kükürtdioksit (SO_2) ve Azotoksit (NO_x) seyirleri



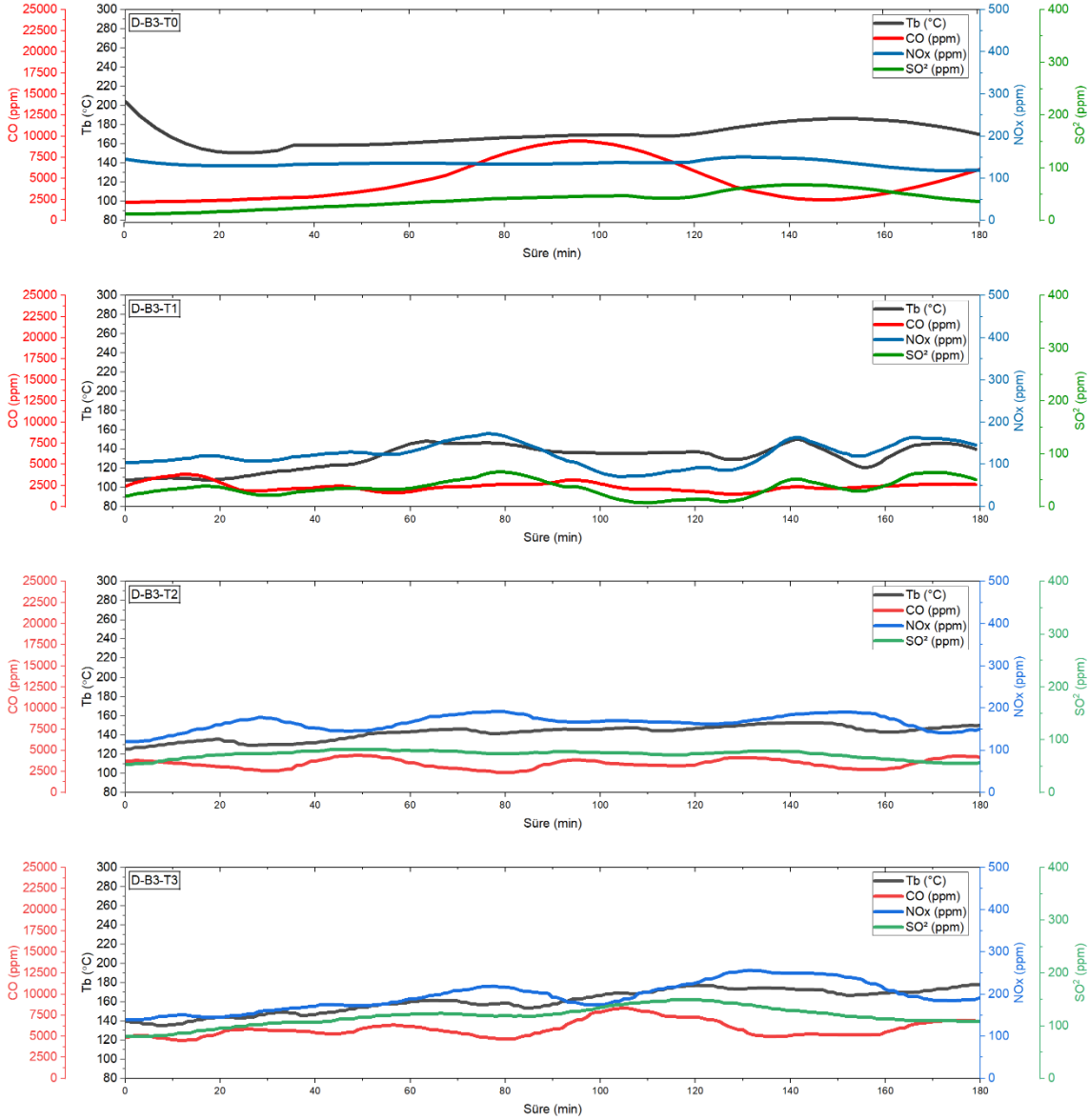
EK-37. Birinci buhar düzeyinde (B1) üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen (T0, T1, T2, T3) sera domates sapı peletlerinin yanma süreci boyunca ölçülen baca gazı sıcaklığı (T_b), Karbonmonoksit (CO), Kükürtdioksit (SO_2) ve Azotoksit (NO_x) seyirleri



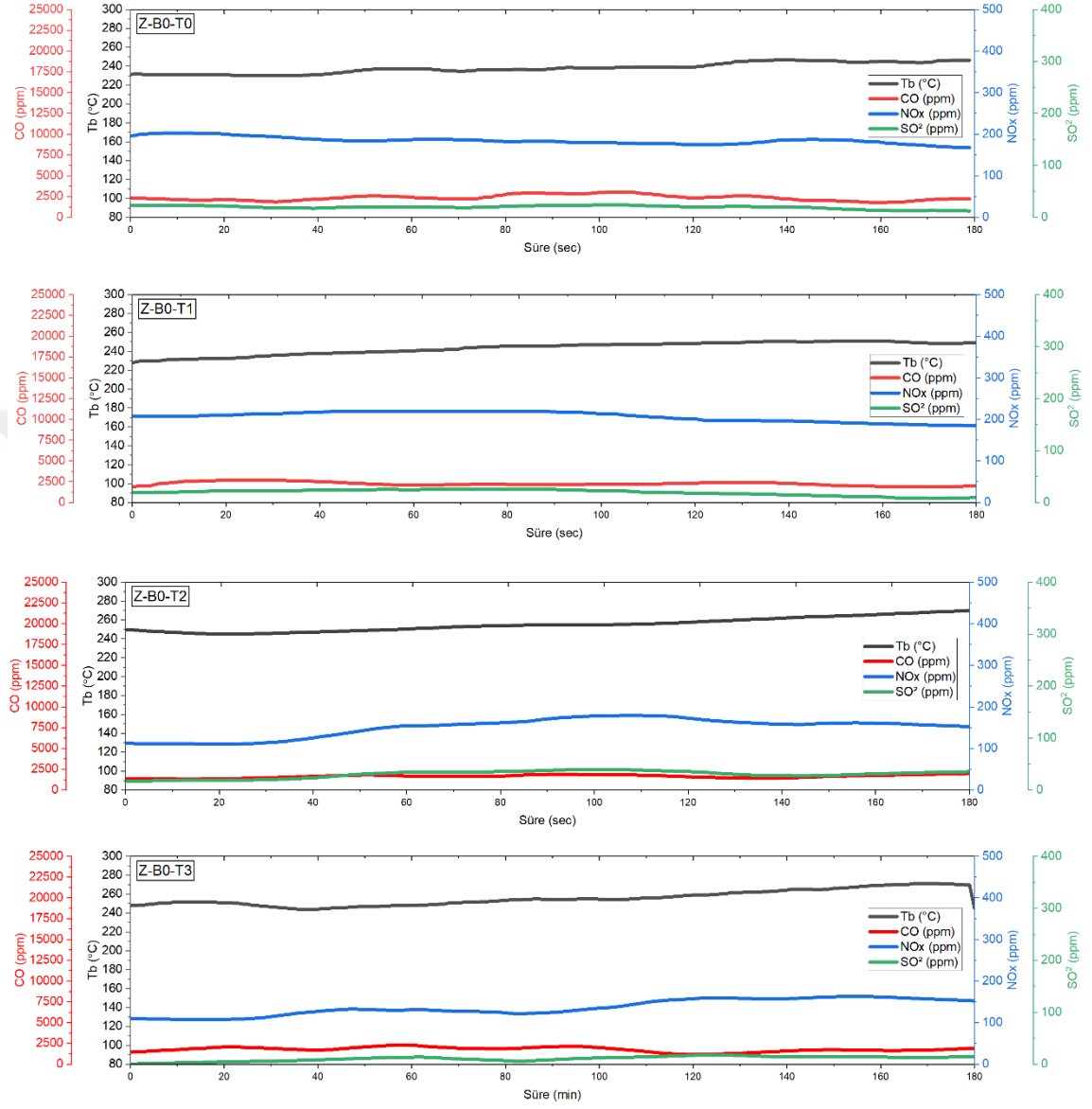
EK-38. İkinci buhar düzeyinde (B2) üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen (T0, T1, T2, T3) sera domates sapı peletlerinin yanma süreci boyunca ölçülen baca gazı sıcaklığı (T_b), Karbonmonoksit (CO), Kükürtdioksit (SO_2) ve Azotoksit (NO_x) seyirleri



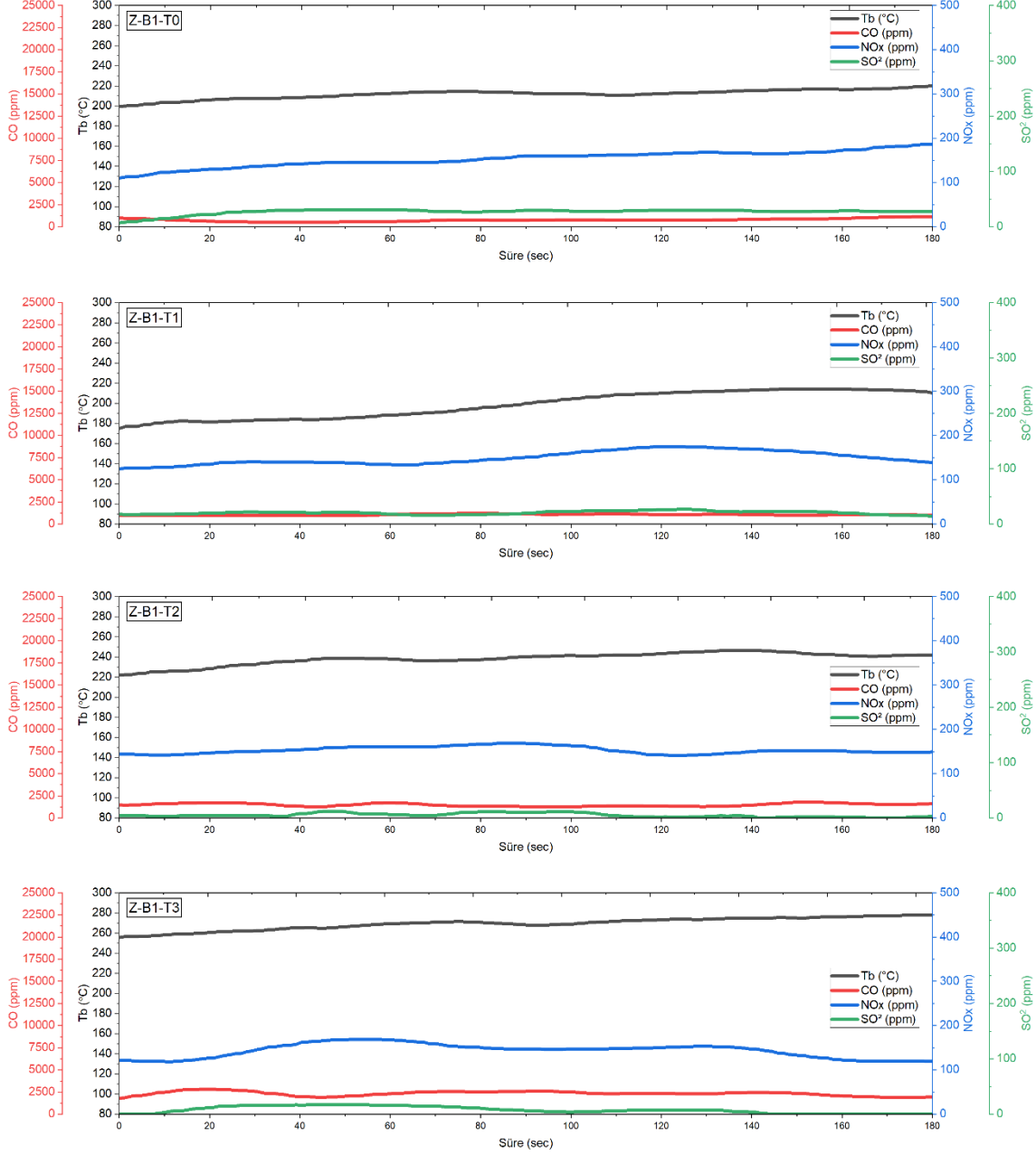
EK-39. Üçüncü buhar düzeyinde (B3) üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen (T0, T1, T2, T3) sera domates sapı peletlerinin yanma süreci boyunca ölçülen baca gazı sıcaklığı (Tb), Karbonmonoksit (CO), Kükürtdioksit (SO₂) ve Azotoksit (NO_x) seyirleri



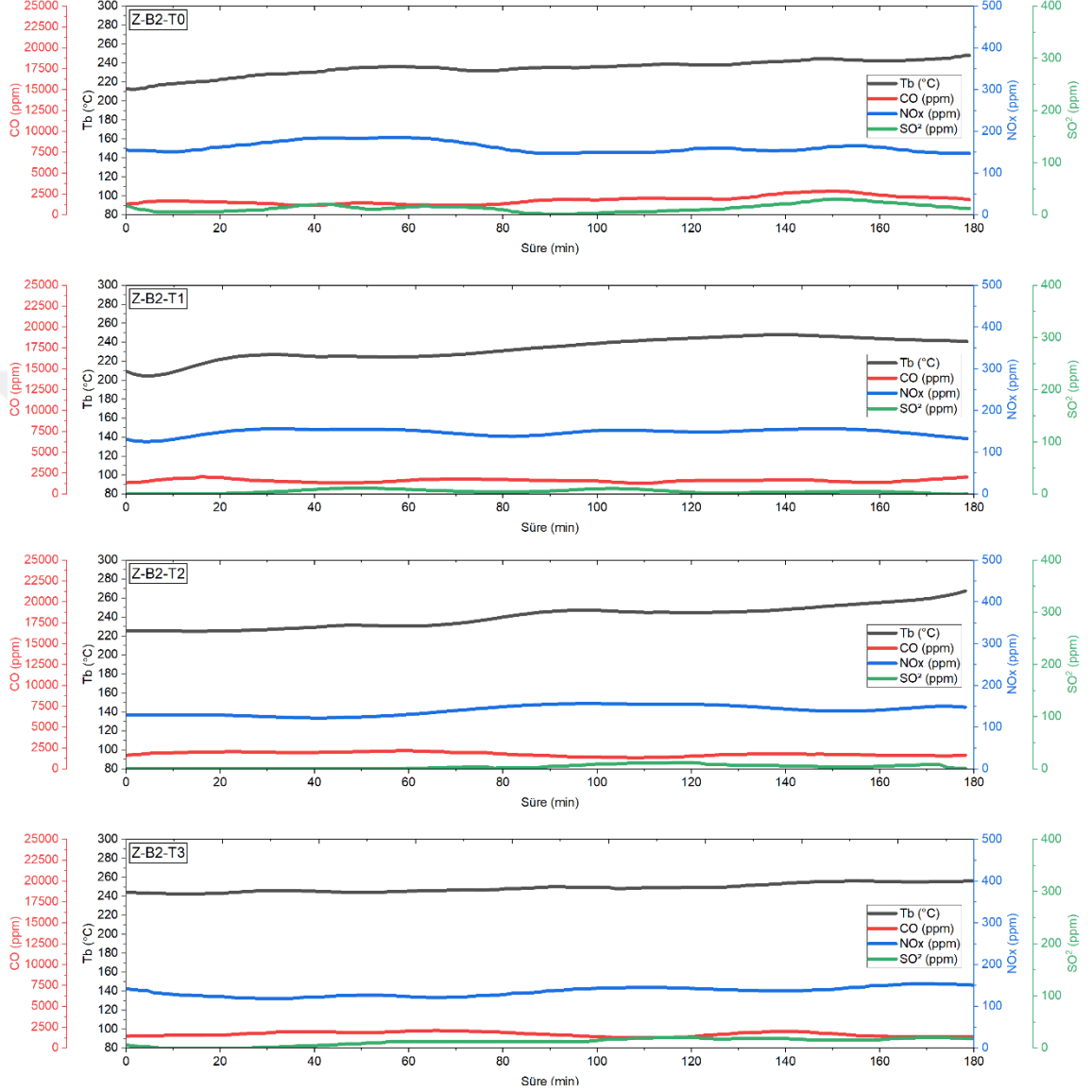
EK-40. Buharsız (B0) üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen (T0, T1, T2, T3) zeytin budama artığı peletlerinin yanma süreci boyunca ölçülen baca gazı sıcaklığı (T_b), Karbonmonoksit (CO), Kükürtdioksit (SO_2) ve Azotoksit (NO_x) seyirleri



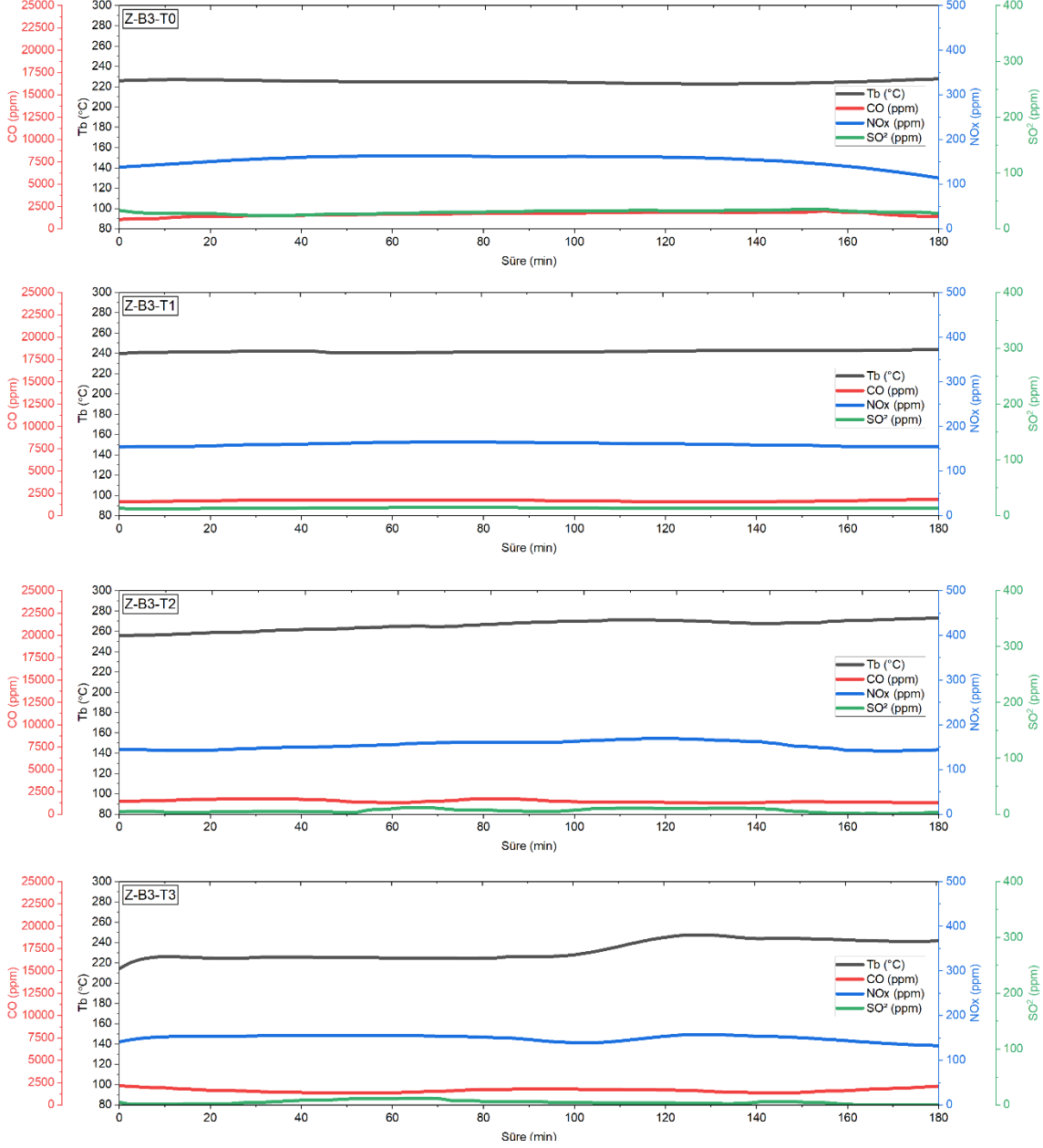
EK-41. Birinci buhar düzeyinde (B1) üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen (T0, T1, T2, T3) zeytin budama artığı peletlerinin yanma süreci boyunca ölçülen baca gazı sıcaklığı (T_b), Karbonmonoksit (CO), Kükürtdioksit (SO_2) ve Azotoksit (NO_x) seyirleri



EK-42. İkinci buhar düzeyinde (B2) üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen (T0, T1, T2, T3) zeytin budama artığı peletlerinin yanma süreci boyunca ölçülen baca gazı sıcaklığı (T_b), Karbonmonoksit (CO), Kükürtdioksit (SO_2) ve Azotoksit (NO_x) seyirleri



EK-43. Üçüncü buhar düzeyinde (B3) üretilen ve artan sıcaklıklarda torefiye edilen (T0, T1, T2, T3) zeytin budama artığı peletlerinin yanma süreci boyunca ölçülen baca gazı sıcaklığı (T_b), Karbonmonoksit (CO), Kükürtdioksit (SO_2) ve Azotoksit (NO_x) seyirleri



ÖZGEÇMİŞ

Hasan YILMAZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

| | |
|----------------------------|--|
| Doktora 2015-2022 | Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği ABD |
| Yüksek Lisans 2012-2014 | Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği ABD |
| Lisans 2005-2011 | Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Ziraat Mühendisliği Bölümü, Tarım Makinaları Alt Programı |

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

| | |
|----------------------------------|--|
| Araştırma Görevlisi 2013-2022 | Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği ABD |
|----------------------------------|--|

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1. Yılmaz, H. , Topakcı, M. Çanakcı, M. & Karayel, D. (2022). Effect of Die Geometry ve Moisture Content on Pelletizing of Palm Pruning Residues . Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 19 (1) , 204-214 . DOI: 10.33462/jotaf.976990
2. Yılmaz, H. Topakcı, M. Varol, M. Çanakcı, M. Karyel D. (2021). Effect of Torrefaction Conditions on Physical ve Thermal Properties of High- ve Low-Quality Palm Pruning Residue Pellets. Bioenerg. Res. 15, 530–543. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10339-4>.
3. Yılmaz H. Çanakcı, M. Topakcı, M. Karyel D. (2021). The effect of raw material moisture ve particle size on agri-pellet production parameters ve physical properties: A case study for greenhouse melon residues, Biomass ve Bioenergy, Volume 150, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106125>.
4. Yılmaz, H. Topakcı, M. Karyel D. Çanakcı, M. (2020) Comparison of the physical properties of cotton ve sesame stalk pellets produced at different moisture contents ve combustion of the finest pellets, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, ve Environmental Effects, DOI: 10.1080/15567036.2020.1850931

5. Celik, H.K. Yılmaz, H. Rennie, A.E.W. et al. (2018). Determination of the Failure Susceptibility of a Flat Die Used in Biomass Pelletizing Machines by Means of FEA-Based Design Exploration. *J Fail. Anal. ve Preven.* 18, 1099–1110 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11668-018-0497-2>
6. Bilgin, S. Yılmaz H. Koçer, A. (2015). Briquetting of greenhouse pepper crop residues. *Agric Eng Int: CIGR Journal. Special issue 2015.*

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1. Yılmaz, H. Topakcı, M. Çanakçı, M. Karyel D. Varol, M. (2021) Palmiye Budama Artığı Peletlerinde Torefikasyon Sıcaklığı ve Bekleme Süresinin Su Emilim Direncine Etkisi. 33. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi, Isparta, Türkiye, 01 Ekim 2021, ss.27.
2. Koçer, A. Yaka, İ. F. Yılmaz, H. Güngör, A. Farklı Oranlardaki Mısır Sapı Biyokütlesi İle Kömür Karışımının Gazlaştırma Performansı. (2017). 1. Uluslararası Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, Antalya, Türkiye, 7 - 10 Aralık 2017, ss.515-519.
3. Bilgin, S. Koçer, A. Yılmaz H. Acar, M. Dok, M. (2016). Çay Fabrikası Atıklarının Peletlenmesi ve Pelet Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, cilt.33, sa.Ek, ss.70-80.
4. Bilgin, S. Koçer, A. Yılmaz H. Acar, M. Dok, M. (2015). Fındık Zurufunun Peletlenmesi ve Pelet Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, cilt.11, sa.3, ss.265-273.
5. Bilgin, S. Karayel, D. Yılmaz, H. (2015). Palmiye Budama Artıklarının Briketlenmesi. 29. Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi, Diyarbakır, Türkiye, 2 - 05 Eylül 2015, ss.100-107.