

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI TARIMSAL ARTIKLARIN PELETLENMESİ ve PELET FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

Hasan YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
TARIM MAKİNALARI ve TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

2014

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI TARIMSAL ARTIKLARIN PELETLENMESİ ve PELET FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

Hasan YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
TARIM MAKİNALARI ve TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**(Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
tarafından 2014.02.0121.015 nolu proje ile desteklenmiştir.)**

2014

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI TARIMSAL ARTIKLARIN PELETLENMESİ ve PELET FİZİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

Hasan YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
TARIM MAKİNALARI ve TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Bu tez 29/12/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Sefai BİLGİN

Prof. Dr. Ahmet KÜRKÜ

Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR

ÖZET

BAZI TARIMSAL ARTIKLARIN PELETLENMESİ ve PELET FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Hasan YILMAZ

Yüksek Lisans Tezi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği
Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Sefai BİLGİN

Aralık 2014, 67 sayfa

Bu çalışmada, tarımsal üretim alanlarından çıkan pamuk ve susam saplarının peletlenmesi amaçlanmıştır. Materyallerin peletlenmesi için 15 kW elektrik motor gücüne sahip, 70-100 kg/h kapasiteli, kalıp delik çıkış çapı 8 mm olan düz kalıp pres pelet makinesi kullanılmıştır. Denemelerde 3 farklı nem içeriğine sahip kurutulup-öğütülmüş pamuk ve susam sapları (pamuk sapı: %10.70 (P1), %15.13 (P2) ve %20.37 (P3), susam sapı: %10.67 (S1), %14.88 (S2) ve %20.22 (S3)) ve sıvı melas karışımı (15 kg hammadde + 1.125 kg melas (%7.5)) kullanılmıştır. Peletlerin kalitesi ile ilgili olarak fiziksel özellikleri (pelet hacim yoğunluğu, pelet parça yoğunluğu, dayanıklılık direnci, kırılma direnci, sıkıştırma direnci, gerilme direnci ve nem alma direnci) belirlenmiştir. Ayrıca pelet makinesinin pelet üretim kapasitesi belirlenmiş ve elektrik enerjisi tüketim değerleri ölçülmüştür. Test öncesi bütün peletler 7 gün boyunca 22°C ve %60 bağıl neme sahip kapalı çevre şartlarında bekletilmiştir.

Çalışma sonunda, materyal çeşidine ve nem içeriğine bağlı olarak ortalama 8.1-8.97 mm çap aralığında silindirik peletler elde edilmiştir. Peletlerin hacim ve parça yoğunluğu materyal çeşidine ve nem içeriğine bağlı olarak sırası ile 430-717 kg/m³ ve 922-1368 kg/m³ arasında değişmiş ve nem içeriği arttıkça yoğunluk değerleri azalmıştır. Pamuk ve susam sapı peletlerinin fiziksel testler sonunda oldukça sağlam yapıya sahip oldukları görülmüş ve en yüksek değerler pamuk sapı için P1 ve susam sapı için ise S2 peletlerinde elde edilmiştir. Pelet makinesinin kapasitesi ve elektrik enerjisi tüketimi değerleri ise, materyal çeşidine ve nem içeriğine bağlı olarak, sırası ile 131-306 kg/h ve 18.40-22.64 kWh arasında değişmiştir.

ANAHTAR KELİMELE: Biyokütle, pamuk sapı, susam sapı, pelet, pelet fiziksel özellikleri

JÜRİ: Yrd. Doç. Dr. Sefai BİLGİN (Danışman)

Prof. Dr. Ahmet KÜRKLÜ

Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR

ABSTRACT

A RESEARCH ON THE PELLETING OF VARIOUS AGRICULTURAL RESIDUES AND DETERMINATION OF PELLET PHYSICAL PROPERTIES

Hasan YILMAZ

MSc Thesis in Agricultural Machinery and Technologies Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Sefai BİLGİN

December 2014, 67 pages

In this study, pelleting of sesame and cotton stalks obtained from agricultural areas were aimed. In the experiments, pelleting machine with 15 kW electric motor power, 8 mm die diameter and 70-100 kg/h capacity for pelleting of raw materials was used. The experiments were conducted in three different moisture content (cotton stalk: %10.70 (P1), %15.14 (P2), %20.37 (P3) and sesame stalk: %10.67 (S1), %14.88 (S2), %20.22 (S3)) of dried-ground sesame and cotton stalks and liquid molasses mixtures (15 kg raw material + 1.125 kg molasses (7.5%)). The physical properties of pellets such as bulk density, particle density, durability resistance, shatter resistance, compressive resistance, tensile strength and moisture sorption resistance were determined. Also, average capacity of pelleting machine and its energy consumption values were measured. Before testing, the pellets were kept in a room at 22°C temperature and 60% relative humidity during 7 days for ensure their stabilization.

At the end of the study, pellets were produced with a diameter range 8.1 - 8.97 mm depending on material type and moisture content. The bulk density and particle density of pellets were between 430-717 kg/m³ and 922-1368 kg/m³ depending on material type and moisture content, respectively, and pellet densities were decreased with increasing moisture content. The result of physical tests showed that the produced pellets were quite strong due to durability resistance, shatter resistance, compressive resistance, tensile strength and moisture sorption resistance and the highest values were obtained in P1 pellets for cotton stalk and S2 pellets for sesame stalk. The average production capacity and energy consumption of pelleting machine were found between 131-306 kg/h and 18.40-22.64 kWh depending on material type and moisture content, respectively.

KEYWORDS: Biomass, cotton stalk, sesame stalk, pellet, pellet physical properties

COMMITTEE: Asst. Prof. Dr. Sefai BİLGİN (Supervisor)

Prof. Dr. Ahmet KÜRKLÜ

Assoc. Prof. Dr. Afşin GÜNGÖR

ÖNSÖZ

Günümüzde enerji ihtiyacı geçmiş yıllara oranla artmış, ilerleyen dönemlerde nüfus artışı ve gelişmekte olan ülkelerin sanayileşme politikaları nedeniyle artmaya devam edecektir. Artan enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla, sanayi devriminden bu yana sınırsız gibi görülen fakat yakın gelecekte tükeneceği bildirilen fosil yakıt rezervlerinin gün geçtikçe tedarik süreci zorlaşmakta, arz talep piyasası nedeniyle fiyatı artmaktadır. Özellikle gelişmiş ülkeler bu durumun farkına varmış olup sürdürülebilir bir enerji döngüsü için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütle enerjisi tarımsal artıklardan da elde edilmekte olup ülkemiz bu konuda ciddi kaynaklara sahiptir. Ülkemizde, her yıl üretilen tarımsal ürünlerin artık miktarı ve enerji değerleri ele alındığında, büyük oranda dışa bağımlı olduğumuz enerji ihtiyacımızın azımsanamayacak ölçüde bir bölümünü karşılayacaktır. Son yıllarda tarımsal artıkların pelet ve briket olarak evsel ısıtma, elektrik ve ısı üretimi gibi alanlarda kullanımının yaygınlaşması ile biyokütle enerjisinin farkına varılması ve etkin kullanımı açısından önem arz etmektedir. Yapılan çalışmanın ülkemizin mevcut biyokütle enerji potansiyelinin farkındalığının artması ve kullanımının yaygınlaştırılmasına katkısı olmasını dilerim.

Bu çalışmanın hazırlanması ve araştırılmasında, çalışmanın her aşamasında her türlü bilgi ve öneriyle bana yön veren danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Sefai BİLGİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü Öğretim Elemanları'na, denemeler süresince yardımlarından dolayı Tarım Makinaları Anabilim Dalı yüksek lisans öğrencilerine, istatistiksel analizlerde desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Ebru KAYA BAŞAR'a, projeye sağladıkları maddi kaynak için Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne, beni bu günlere getiren ve varlıklarıyla huzur bulduğum aileme, her durumda benden sevgi ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Merve YILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMALARI	4
2.1. Dünya ve Avrupa Birliği (AB) Ülkelerinde Biyokütle Enerjisi	5
2.2. Türkiye’de Biyokütle Enerjisi	7
2.3. Pelet ve Peletleme Teknolojileri	9
2.4. Kaynak Taramaları	12
3. MATERYAL ve METOT	21
3.1. Materyal	21
3.2. Metot	27
3.2.1. Materyalin peletlenmeye hazırlanması ve peletlenmesi	27
3.2.2. Materyal parçacık boyut dağılımı	30
3.2.3. Makine kapasitesi ve enerji tüketimi	30
3.2.4. Pelet fiziksel özellikleri ve testler	31
3.2.4.1. Pelet parça yoğunluğu	31
3.2.4.2. Pelet hacim yoğunluğu	32
3.2.4.3. Pelet dayanıklılık direnci	32
3.2.4.4. Pelet kırılma direnci	33
3.2.4.5. Pelet sıkıştırma direnci	33
3.2.4.6. Pelet nem içeriği	34
3.2.4.7. Pelet nem alma direnci	34
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	36
4.1. Makina Kapasitesi ve Enerji Tüketimi	36
4.2. Pelet Fiziksel Özellikleri	37
4.2.1. Pelet nem içeriği	37
4.2.2. Pelet hacim ve parça yoğunluğu	38
4.2.3. Pelet dayanıklılık direnci ve kırılma direnci	40
4.2.4. Peletlerin sıkıştırma direnci, özgül sıkıştırma direnci ve gerilme direnci	46
4.2.5. Peletlerin nem alma direnci	49
5. SONUÇ	57
6. KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

D_d	Dayanıklılık direnci (%)
d	Pelet çapı (m)
F	Maksimum kırılma kuvveti (N)
k.b.	Kuru baz
l	Pelet uzunluğu (m)
M	Pelet nem içeriği (% y.b)
m_1	Boş kabın ağırlığı (kg)
m_2	Pelet dolu kabın ağırlığı (kg)
M_f	Materyalin son durumdaki nem içeriği (%)
M_i	Materyalin ilk durumdaki nem içeriği (%)
m_A	Test sonrası elenmiş pelet ağırlığı (g)
m_E	Test öncesi elenmiş pelet ağırlığı (g)
m_f	Pelet örneklerinin son ağırlıkları (g)
m_i	Pelet örneklerinin ilk ağırlıkları (g)
m_u	Tek pelet ağırlığı (kg)
m_{p1}	Boş kuru örnek kabının ağırlığı (g)
m_{p2}	Kurutma öncesi kuru örnek kabı ve peletlerin ağırlığı (g)
m_{p3}	Kurutma sonrası kuru örnek kabı ve peletlerin ağırlığı (g)
P_a	Pelet örneklerinin nem alması (%)
Q	Eklenecek su miktarı (g)
V	Kabın net hacmi (m ³)
V_u	Tek pelet hacmi (m ³)
W_i	Materyalin ilk ağırlığı (g)
y.b.	Yaş baz
ρ_{hy}	Pelet hacim yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_u	Pelet parça yoğunluğu (kg/m ³)
σ_x	Gerilme direnci (Pa)

Kısaltmalar

BTEP	Bin ton eşdeğer petrol
DEK-TMK	Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi
EIA	Energy Information Administration
EJ	Egza Joule
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
IEA	International Energy Agency
MTEP	Milyon ton eşdeğer petrol
TMMOB	Türkiye Makine Mühendisleri Odası Birliği
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kaynak bazında dünya yıllık enerji tüketimi	5
Şekil 2.2. Düz kalıplı (a) ve çember kalıplı (b) peletleme teknolojisi	10
Şekil 3.1. Pamuk sapları (a) ve susam sapları (b)	21
Şekil 3.2. Dal parçalama makinesi genel görünüşü	22
Şekil 3.3. Çekiçli değirmen genel görünüşü ve öğütme ünitesi.....	22
Şekil 3.4. Pelet makinası genel görünümü	23
Şekil 3.5. Pelet makinası sıkıştırma diskleri ve kalıp	23
Şekil 3.6. Kurutma fırını (Etüv)	23
Şekil 3.7. Elek analiz seti	24
Şekil 3.8. Dayanıklılık test cihazı ve kafes ölçüleri	24
Şekil 3.9. Sıkıştırma direnci test cihazı	25
Şekil 3.10. İklimlendirme test kabini	25
Şekil 3.11. Elektronik terazi (a), dijital kumpas (b).....	26
Şekil 3.12. Enerji analizörü.....	26
Şekil 3.13. Parçalanmış susam (a) ve pamuk sapları (b)	27
Şekil 3.14. Öğütülmüş susam (a) ve pamuk sapları (b)	27
Şekil 3.15. Elde edilen pamuk sapı peletlerinin görünümü	29
Şekil 3.16. Elde edilen susam sapı peletlerinin görünümü	29
Şekil 3.17. Peletleme işlemi sonrası kalıp sıcaklığı	29
Şekil 3.18. Elek analizi sonrası öğütülmüş pamuk saplarının boyut dağılımı	30
Şekil 3.19. Elek analizi sonrası öğütülmüş susam saplarının boyut dağılımı	30
Şekil 3.20. Pelet hacim yoğunluğunun belirlenmesi	32
Şekil 3.21. Dayanıklılık direnci testi sonrası elenen peletler	33
Şekil 3.22. Pelet sıkıştırma direnç testi	34
Şekil 4.1. P1 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri	41
Şekil 4.2. P2 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri	42
Şekil 4.3. P3 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri	42
Şekil 4.4. S1 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri	42
Şekil 4.5. S2 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri	43
Şekil 4.6. S3 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görüntüleri	43
Şekil 4.7. Pamuk sapı materyal nem içeriğinin pelet yoğunluğu ve dayanıklılık direnci üzerin etkisi	43
Şekil 4.8. Susam sapı materyal nem içeriğinin pelet yoğunluğu ve dayanıklılık direnci üzerin etkisi	44
Şekil 4.9. P1 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görüntüleri	44
Şekil 4.10. P2 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görüntüleri	44
Şekil 4.11. P3 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görüntüleri	45
Şekil 4.12. S1 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görüntüleri	45
Şekil 4.13. S2 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görüntüleri	45
Şekil 4.14. S3 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görüntüleri	46

Şekil 4.15. P1 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	47
Şekil 4.16. P2 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	48
Şekil 4.17. P3 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	48
Şekil 4.18. S1 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	48
Şekil 4.19. S2 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	48
Şekil 4.20. S3 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	49
Şekil 4.21. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 15°C sıcaklık ve %45 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi.....	50
Şekil 4.22. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 15°C sıcaklık ve %60 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi.....	50
Şekil 4.23. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 15°C sıcaklık ve %80 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi.....	51
Şekil 4.24. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 25°C sıcaklık ve %45 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi.....	52
Şekil 4.25. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 25°C sıcaklık ve %60 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi.....	52
Şekil 4.26. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 25°C sıcaklık ve %80 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi.....	53
Şekil 4.27. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 40°C sıcaklık ve %45 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi.....	54
Şekil 4.28. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 40°C sıcaklık ve %60 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi.....	54
Şekil 4.29. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 40°C sıcaklık ve %80 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi.....	55
Şekil 4.30. P1 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	56
Şekil 4.31. P2 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	57
Şekil 4.32. P3 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	57
Şekil 4.33. S1 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	57
Şekil 4.34. S2 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	58
Şekil 4.35. S3 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Pamuk ve susam bitkisi üretim alanları ve tarımsal artık miktarları	2
Çizelge 2.1. Bazı tarımsal materyallerin ısı değerleri ve kül içerikleri	5
Çizelge 2.2. Materyallerin enerji maliyet değerleri (piyasa verilerine göre hesaplanmıştır)	7
Çizelge 2.3. Mevcut ve planlanan biyokütle enerji üretimi (BTEP).....	9
Çizelge 3.1. Demelerde kullanılan materyallerin fiziksel özellikleri.....	28
Çizelge 4.1. Peletleme makina kapasitesi, elektrik enerji tüketimi değerleri ve varyans analiz sonuçları.....	36
Çizelge 4.2. Peletlerin peletleme makinesinden çıkış ve 7.gün sonu nem içerikleri	38
Çizelge 4.3. Peletlerin hacim ve parça yoğunluk, çap, uzunluk ve ağırlık değerleri ile varyans analizi sonuçları.....	39
Çizelge 4.4. Peletlerin dayanıklılık ve kırılma direnci değerleri ve varyans analizi sonuçları.....	40
Çizelge 4.5. Peletlerin sıkıştırma direnci, özgül sıkıştırma direnci ve gerilme direnci değerleri ve varyans analizi sonuçları	46
Çizelge 4.6. Peletlerin nem alma direnci test öncesi ve sonrası nem değerleri	49
Çizelge 4.7. Peletlerin 27°C ve %90 bağıl nem şartlarında nem alma durumu.....	56

1. GİRİŞ

Dünya enerji gereksinimi nüfus artışı ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak son yıllarda çok hızlı bir şekilde artmış ve gelecek 50 yıl içerisinde de özellikle sanayileşmenin yol açacağı büyümeye bağlı olarak artacağı tahmin edilmektedir (Goswami ve Kreith 2007). Dünyada, özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, en fazla kullanılan birincil enerji kaynağı fosil enerji kaynakları olan kömür ve petroldür. 2012 yılı dünya toplam birincil enerji arzının (13373 MTEP) %81.7'si fosil enerji kaynaklarından (petrol, kömür, doğal gaz), %4.8'i ise nükleer enerjiden karşılanmıştır (IEA 2014). Fosil enerji kaynaklarının yoğun kullanımı sonucu dünyadaki fosil enerji kaynak rezervleri giderek azalmıştır. Bununla birlikte fosil yakıt kullanımının çevreye olan olumsuz etkileri, mevcut teknolojilerin fosil enerji kullanım verimlerinin düşük olması ve ileride bu teknolojilerin gelişerek fosil enerji kullanım verimlerinin artabileceği olasılığı nedeniyle fosil enerji kaynaklarının gelecek nesillere aktarılması gerekliliği söz konusudur.

Fosil yakıt kullanımının başlıca iki önemli dezavantajı vardır. Birincisi; fosil yakıtların yakıldıkları zaman iklim değişikliğine neden olan kirletici özellikteki sera gazlarını yaymaları, ikincisi ise; yeterli fosil yakıt rezervlerine sahip olmayan ülkelerin enerji arzlarının güvenliğindeki artan risklerle yüz yüze kalmalarıdır (EC 2005). Son yıllarda gelişmiş ülkelerin büyük kentsel alanlarında fosil yakıtların aşırı tüketimi dünya sera gazı emisyonlarını çok hızlı bir şekilde artırmış ve bunun sonucunda yüksek seviyelerde kirlilik meydana gelmiştir (Ballesteros vd 2006). 1973 yılında atmosfere yıllık 15633 Mt karbondioksit (CO₂) salınımı yapılırken, 2012 yılında bu değer %102 artarak 31734 Mt CO₂'ye çıkmıştır. İlgili çalışmalarda sera gazı emisyonlarının 2009-2035 yılı projeksiyonunda artmaya devam edeceği, 2035 yılında %17 artışla 37 Gt seviyesine çıkacağı belirtilmiştir (IEA 2014).

Atmosferde milyonlarca yıldır 180-280 ppm arasında değişen eşdeğer CO₂ emisyonu son yarım yüz yılda hızla artmış ve 450 ppm seviyesine çıkmıştır. Açıklanan senaryolara göre CO₂ emisyonu eşdeğerinin bu seviyelerde kalması durumunda dünya ortalama sıcaklığının 2°C artacağı belirtilmiştir (IEA 2009). Diğer bir senaryoda ise 2030 yılı için belirtilen büyüme oranının ve fosil yakıt tüketiminin devam etmesi durumunda atmosferde sera gazlarının uzun dönem konsantrasyonunun 1000 ppm CO₂ eşdeğerini aşacağı, buna bağlı olarak ortalama sıcaklığın 6°C'den fazla artacağı, deniz seviyesindeki artışın 3.7 m olacağı ve deniz kenarındaki alanların %50'sinin sular altında kalacağı belirtilmiştir (IEA 2009).

Fosil enerji kaynaklarının atmosferde oluşturduğu kirliliğin farkına varılması, fosil kaynaklı yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve birçok ülkede özellikle 1973 enerji krizinden sonra petrol kökenli enerji kaynaklarının yerine, çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarına (biyokütle, güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermal enerji) yönelik çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan, çevreyi koruyan ve kirliletmeyen ve tüm dünyada oldukça güncel olan, giderek artan enerji gereksinimini sürdürülebilir bir şekilde sağlayabilecek enerji kaynaklarından birisi de biyokütle enerjisidir. Biyokütle enerjisinin geçmişi diğer bütün enerji kaynaklarından daha

eskidir. Biyokütle enerji kaynakları içerisinde en eski ve bilineni odun olup kullanımı ateşin bulunuşuna kadar uzanmaktadır.

Ana bileşenleri karbonhidrat bileşikler olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm maddeler “biyokütle enerji kaynağı”, bu kaynaklardan üretilen enerji ise “biyokütle enerjisi” olarak tanımlanmaktadır (Eriş 2003)

Yakın bir geçmişe kadar az gelişmiş ülkelerin enerji tüketiminde büyük paya sahip olan ve genellikle doğrudan yakma sonucu elde edilen biyokütle enerjisi, günümüzde modern teknoloji kullanılarak üretilen, gelişmiş ülkelerin enerji portföyünde yer bulan ve ciddi politikalarla yaygınlaştırılmaya çalışılan, çevre dostu, stratejik bir enerji kaynağıdır (DEK-TMK 2013).

1.1. Çalışmanın Amacı

Türkiye’de ve Antalya ilinde tarımsal üretim yapılan pamuk ve susam alanlarından her yıl büyük miktarlarda tarımsal artık çıkmaktadır. 2013 yılında Türkiye ve Antalya ili pamuk ve susam bitkisi üretim alanları ve bu alanlardan çıkan tarımsal artık miktarları Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Pamuk ve susam bitkisi üretim alanları ve tarımsal artık miktarları

Ürün	Artık	Üretim alanı (ha)*	Artık miktarı (k.b) (t/ha)	Toplam artık miktarı (t/yıl)
TÜRKİYE				
Pamuk	Sap	450890	4.10**	18486490
Susam	Sap	24807	7.42***	184067
ANTALYA				
Pamuk	Sap	5907	4.10	24218
Susam	Sap	5115	7.42	37953

(* TUİK 2014, ** Kürklü ve Bilgin 2007, *** Sarkar ve Pal 2005)

Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi her yıl Türkiye’de pamuk ve susam bitkisi üretim alanlarından kuru bazda yaklaşık olarak sırası ile 18.5 milyon ton ve 184 bin ton, Antalya ilinde ise 24.2 bin ton ve 38 bin ton tarımsal artık çıkmaktadır. Bu artıkların büyük çoğunluğu ticari olarak değerlendirilmemektedir.

Bu artıklar ya bir parçalayıcı ile parçalanıp toprağa karıştırılarak organik madde olarak değerlendirilmekte ya da tarımsal üretim alanlarında toplanarak doğrudan yakılmak suretiyle imha edilmektedir. Tarımsal artıkların doğrudan yakılarak imha edilmesi hem çevre kirliliğine hem de enerji kaynağı olan biyokütle hammaddesinin yok olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu tür biyokütle artıklarının enerji amacı ile değerlendirilip ülke ekonomisine kazandırılması gerekmektedir.

Tarımsal artıklar düşük yoğunluğa ve yüksek nem içeriğine sahip olduklarından (pamuk bitkisi, ayçiçeği sapı, domates, biber ve patlıcan bitkisi sapı vb.) enerji eldesi için doğrudan yakılmaları etkin olmamakta ve atmosfere çok büyük miktarlarda kirlletici

emisyon ve partikül madde salınmaktadır. Ayrıca, bu artıkların taşınmasında ve depolamasında sorunlar ortaya çıkmakta, nakliye ve taşıma maliyetleri artmaktadır. Bu nedenle bu tür tarımsal artıkların enerji kaynağı olarak katı yakıt formunda etkin bir biçimde değerlendirilmesi yollarından birisi de onların kurutulup öğütüldükten sonra peletlenmesidir. Materyallerin peletlenmesi ile materyal yoğunluğu artmakta, kaliteli, ucuz, çevre dostu ve yenilenebilir bir enerji kaynağı elde edilmekte, nakliye ve depolama masrafları azalmaktadır.

Bu çalışmada, kurutulup öğütülmüş pamuk ve susam saplarının yapıştırıcı materyal olarak sıvı melasla karışımlarından elde edilen hammaddenin üç farklı nem içeriğinde 15 kW motor gücüne sahip, kapasitesi 70-100 kg/h olan, düz kalıp dairesel sıralı delikli, kalıp delik çapı 8 mm olan peletleme makinasında peletlenmesi amaçlanmıştır. Peletlerin kalitesi ile ilgili yoğunluk, dayanıklılık direnci, kırılma direnci, sıkıştırma direnci, gerilme direnci ve nem alma direnci gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada, ayrıca peletleme makinasının kapasitesi belirlenmiş ve elektrik enerjisi tüketimi değerleri ölçülmüştür.

2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMALARI

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer alan biyokütle, yakıt eldesi için birçok avantajı sahiptir. Biyokütle kaynaklarından çeşitli işlemler sonucu katı, sıvı ve gazlı yakıtlar vb. ürünler elde edilmekte ve bu yakıtların yakılması ile de ısı ve elektrik üretilmesi mümkün olmaktadır. Bununla birlikte biyokütle kaynaklarının tamamı enerji eldesi için kullanılmamaktadır. Biyokütle aynı zamanda gıda, kağıt, kereste ve bazı yüksek değerli kimyasalların eldesi için de kullanılabilir. Bu nedenle, daha verimli değerlendirme için, biyokütle kaynakları diğer öncelikli uygulamalarla entegre edilmeli ve sürdürülebilir bir yolla kullanılmalıdır. Ayrıca, biyokütle içerisinde fosil yakıtlarda bulunan çevreye zararlı maddeler ve kükürt olmadığı için de çevre dostu bir yakıttır. Bu sayılan özellikleri ile birlikte, güneş enerjisi var olduğu sürece bitki yetiştiriciliğinin de devam edecek olması biyokütleyle tükenmez bir enerji kaynağı niteliği kazandırmaktadır.

Biyokütle kaynaklarını karadan denize kadar her yerde bulmak mümkündür. Doğal olarak yetişen kaynakların yanı sıra son yıllarda bu kaynağı yetiştiricilik yoluyla elde etmeye yönelik çalışmalar da başlatılmıştır. Biyokütle kaynakları olarak; enerji bitkileri ve kısa döngülü enerji ormanları, tarımsal ve bitkisel artıklar, hayvansal artıklar, orman ürünleri ve artıkları, endüstriyel artıklar, belediye katı artıkları, kanalizasyon artıkları ve sucul bitkiler kullanılmaktadır.

Biyokütle artıkları çoğu gelişmekte olan ülkelerde büyük bir potansiyel oluşturmaktadır. Odun gibi enerji kaynaklarının yerini alıyor olmasına rağmen hala bu artıkların çok az bir kısmı yakıt olarak kullanılmaktadır. Çünkü biyokütle artıkları yüksek nem içeriğine, düşük ısı değere sahiptir ve oldukça çeşitlidir. Bu özellikleri nedeniyle nakliye, depolama ve taşıma masrafları artmakta ve doğrudan yakıt olarak kullanımı pratik olmamaktadır.

Dünyada her yıl büyük miktarlarda tarımsal ve bitkisel artık çıkmasına karşın bu artıkların kullanım oranları oldukça düşüktür. Tarımsal artıklar, yakıt üretimi için önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Temel tarımsal artıklar ayçiçeği, mısır, pamuk ve tahıl samanları ile meyve bahçelerinde ortaya çıkan budama artıklarıdır. Bitkisel artık olarak ise domates, patlıcan, biber, enginar, hıyar ve patates artıkları sayılabilmektedir. Biyokütle artıkları var olan potansiyellerine rağmen enerji kaynağı olarak gerektiği şekilde değerlendirilememektedir. Bu artıklar daha çok gübre amacıyla toprağa gömülürken, üretim alanı çevresinde toplanarak doğrudan yakılmakta ya da çürümeye bırakılmakta veya hayvanlara ot sağlamak amacı ile depolanmaktadır. Tarımsal artıklar enerji kaynağı olarak değerlendirilebilecek ölçüdedir ve ürün çeşidine bağlı olarak farklı ısı değerlerine ve kül içeriklerine sahiptir. Çizelge 2.1’de bazı tarımsal materyallerin ısı değerleri ile kül içerikleri verilmiştir (Grower ve Mishra 1996, Ateş vd 2004, Başçetinçelik vd 2005, Kürklü ve Bilgin 2007).

Çizelge 2.1. Bazı tarımsal materyallerin ısı değerleri ve kül içerikleri

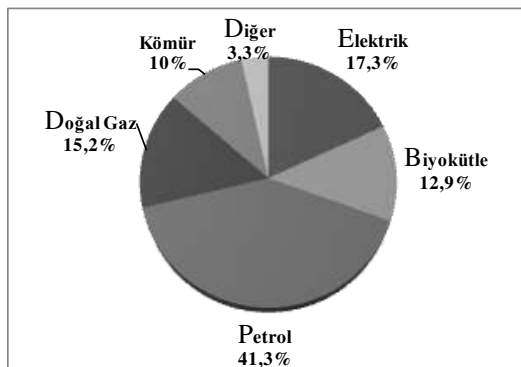
Ürünler	Isıl değer (MJ/kg)	Kül içeriği (%)	Ürünler	Isıl değer (MJ/kg)	Kül içeriği (%)
Mısır koçanı	18.40	1.20	Yerfıstığı kabuğu	20.74	6.00
Ayçiçeği sapı	14.20	1.90	Arpa samanı	17.50	10.30
Zeytin çekirdeği	19.50	3.20	Pirinç samanı	16.70	15.50
Badem kabuğu	19.38	4.80	Susam sapı	19.10	6.63
Pamuk sapı	18.20	5.35	Pirinç kabuğu	12.98	22.40

2.1. Dünya ve Avrupa Birliği (AB) Ülkelerinde Biyokütle Enerjisi

Yenilenebilir enerji kaynağı olan biyokütlenin toplam enerji eşdeğeri 2880 EJ (65376 MTEP) olup bu değer 2012 yılı dünya enerji tüketiminin (8979 MTEP) yaklaşık 7.3 katına eşdeğerdır (Acaroğlu 1998, Acaroğlu ve Ültanır 2000, IEA 2014).

Son yıllarda hızlı sanayileşme, nüfus artışı, kentleşme ve sosyal yaşam düzeyinin artması dünyada enerji tüketimini artırmış, bu da fosil enerji kaynaklarının hızla tükenmesine ve ayrıca ciddi oranda çevre sorunlarına yol açmıştır. Bütün bunların sonucu olarak, gerek enerji ihtiyacını karşılamak gerekse çevre kirliliğini ve küresel iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak için dünyada biyokütle enerjisine büyük önem verilmiş ve son dönemlerde gelişmekte olan ülkelerin yanı sıra gelişmiş ülkelerde de büyük oranlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Biyokütle enerjisi, dünyada kömür ve petrolden sonra en büyük birincil enerji kaynağı olup dünya nüfusunun yarısından fazlası birincil enerji kaynağı olarak biyokütle kullanmaktadır (Chen vd 2009). 1973 yılında dünya yıllık toplam birincil enerji arzının (6111MTEP) %10,5'i biyokütleden karşılanırken, 2012 yılında yıllık toplam birincil enerji arzının (13371 MTEP) yaklaşık %10'u (1337 MTEP), dünya toplam enerji tüketiminin (8979 MTEP) ise yaklaşık %12.4'ü (1113 MTEP), OECD ülkelerinde 2012 yılı toplam birincil enerji arzının (5273 MTEP) %5.3'ü (279.46 MTEP) ve toplam enerji tüketiminin (3582 MTEP) %5'i (179.1 MTEP) biyokütle enerjisinden karşılanmıştır (IEA 2014). Şekil 2.1'de 2012 yılında kaynak bazında dünya yıllık toplam enerji tüketiminde (8979 MTEP) yakıt oranları verilmiştir (IEA 2014).



Şekil 2.1. Kaynak bazında dünya yıllık enerji tüketimi

Son dönemlerde ABD’de ısı ve güç santrallerinde biyokütle kullanımı, biyokütleden sıvı yakıtların, kimyasalların ve biyo-ürünlerin üretimi hızlı bir şekilde artmıştır (Kaliyan ve Mosey 2009). Biyokütle hammaddesinden elde edilen araç yakıtlarının hükümet destekleri ile ve artan petrol fiyatlarına bağlı olarak gelecek dönemlerde daha hızlı bir şekilde artmaya devam edeceği belirtilmiştir. Yeni politik senaryolarda Amerika, Brezilya ve Avrupa Birliği ülkelerinin dünyanın en büyük biyo-yakıt üreticisi ve tüketicisi olduğu, küresel biyo-yakıt kullanımının günlük 1 milyon varilden 2035 yılında 4.4 milyon varile çıkacağı ve belirtilmektedir (IEA 2010).

Avrupa Birliği Ülkelerinde yıllık toplam enerji tüketiminin yaklaşık %7’si yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanırken, biyokütle enerjisinin payı %5 ve biyokütle enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları içindeki payı yaklaşık %70’dir. AB ülkeleri 2020 yılına kadar toplam enerji tüketiminde biyokütlenin payını iki katına ve toplam yenilenebilir enerji kaynaklarının payını ise %20’ye çıkarmayı hedeflemişlerdir (ECC 2007, EC 2010). Biyokütle yakıtları içinde katı yakıtlar AB ülkelerinde enerji üretiminde önemli pay oluşturmaktadır. 2006 yılında 62.4 MTEP enerji eşdeğeri katı biyokütleden elde edilmiş ve bunun 58.5 MTEP’si ısı, 3.90 MTEP’si ise güç üretiminde gerçekleşmiştir (ECC 2007).

Avrupa Birliği Ülkelerinde 2012 yılında üretilen 99 MTEP enerji eşdeğeri biyokütlenin %42’si (41.58 MTEP) Almanya, Fransa ve İsveç’te üretilmiştir (EC 2014).

Avrupa Birliği Ülkeleri içinde Finlandiya enerji ihtiyaçlarının biyokütleden karşılanmasında lider konumdadır ve 2008 yılı toplam birincil enerji tüketiminin %23’ünü biyokütleden karşılamış ve yıllık toplam biyokütle tüketim miktarı 7.7 MTEP olmuştur (IEA 2008). Avrupa Birliği Ülkelerinden İsveç yıllık enerji tüketiminin %19’unu, Danimarka ve Avusturya %12’sini biyokütle kaynaklarından karşılamıştır (ECC 2007).

Almanya yıllık birincil enerji tüketiminin yaklaşık olarak %6.7’sini yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılarken, biyokütlenin payı %4.9 ve yenilenebilir enerji kaynakları içinde biyokütlenin payı %73 olmuştur. Almanya hükümeti 2020 yılına kadar enerji ihtiyacının biyokütleden karşılama oranını %11-15’e çıkaracağını açıklamıştır (BMU 2009).

Bununla birlikte gelişmekte olan ülkelerde toplam yıllık enerji tüketiminin %30’u biyokütle enerjisinden karşılanmaktadır (IEA 2003, IEA 2003c).

Biyokütle, gelişmekte olan ülkelerde yaklaşık olarak 2.4 milyar insan için birincil enerji kaynağıdır ve özellikle yemek pişirme ve ısınma ihtiyaçları için kullanılmakta ve gelişmekte olan ülkelerin kırsal bölgelerinde toplam enerji ihtiyacının %90’ından fazlasını karşılamaktadır (IEA 1998, Bhattacharya ve Salam 2002).

Yenilenebilir enerji kaynaklarına ilginin artması, Avrupa Birliği’nin yenilenebilir enerji teknolojilerindeki küresel öncülüğünü daha da güçlendirmekte, ilgili faaliyet alanlarının tümünde yeni istihdam olanakları yaratmakta, ihracat yoluyla dış ticaret dengesine olumlu katkılar sağlamaktadır (Papur ve Sohtaoğlu 2012).

2.2. Türkiye’de Biyokütle Enerjisi

Türkiye, nüfusu yıldan yıla hızla artan ve oldukça hızlı bir şekilde gelişme gösteren bir ülkedir. Dolayısı ile nüfus artışı ve gelişmişliğe bağlı olarak enerji tüketimi hızla artarken, enerji üretimi yıllardır sabit kalmıştır. Dolayısı ile enerji üretimi tüketimi karşılayamamakta ve enerji açığı her geçen yıl artarak devam etmektedir. Türkiye’nin enerji üretimi 2012 yılı sonunda 32 MTEP olurken, birincil enerji arzı yaklaşık 120 MTEP, nihai enerji tüketimi ise 89 MTEP olmuştur. 2012 yılı sonunda enerji üretiminin enerji arzını karşılama oranı %26.6 olmuştur (ETKB 2014).

Tarımda birim alandan elde edilen verimin artırılması belli bir seviyeye kadar mümkün olabilmektedir. Ancak daha fazla gelir elde etmenin, yerel kalkınmayı ve köyden kente göçün önüne geçmenin yollarından birisi de tarlada artık olarak değerlendirilemeyen biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanılmasından geçecektir. 100 dekar alandan elde edilebilecek biyokütle ekimi yapılan ürüne göre değişmekle birlikte 10-50 ton arasında olmaktadır. Bunun mali değeri ise 3000-15000 TL arasında değişmektedir. Tarımsal üretimle uğraşan üretici için tarımsal artıklardan elde edilecek bu para önemli bir gelir kaynağı olacaktır. Türkiye’nin mevcut enerji kaynaklarının maliyet değerleri ve biyokütlenin maliyetten sağladığı yararın ekonomik boyutu Çizelge 2.2’de verilmiştir (Boztepe ve Karaca 2009).

Çizelge 2.2. Materyallerin enerji maliyet değerleri (piyasa verilerine göre hesaplanmıştır)

Yakıt	Isıl değer (kcal)	Birim fiyatı (ton-m ³)	Ortalama verim (%)	1000 kcal maliyeti (kuruş)	Biyokütleyle göre maliyet artışı
Doğalgaz	8250	808	93	10.50	3.32
İthal kömür	7000	500	60	11.90	3.75
Yerli linyit	3000	350	60	19.40	6.13
Fuel-oil	9200	1080	80	14.70	4.62
Kalorifer yakıtı	9700	1560	80	20.10	6.33
LPG	11000	3710	90	37.50	11.80
Motorin	10200	2350	84	27.40	8.64
Biyokütle	4500	100	70	3.20	1.00
Odun kömürü	7500	500	80	8.30	2.63
Elektrik	860	300	99	35.20	11.10

Türkiye enerjide dışa bağımlı bir ülke olup, enerji ihtiyacının yaklaşık %72’sini dışarıdan ithal yoluyla karşılamaktadır. Bu durum hem ülke ekonomisi üzerinde olumsuz bir etki yapmakta hem de ülke içinde enerji kullanımını oldukça maliyetli kılmaktadır.

Ayrıca önümüzdeki yıllarda petrol ihraç eden komşu ülkeler ve dünya ülkeleri ile meydana gelebilecek anlaşmazlıklar sonucu ortaya çıkabilecek enerji krizleri ve bunun sonucu oluşabilecek petrol ithal yasağı ya da daha yüksek maliyetli petrol ithalatı ülke ekonomisini ve insan yaşamını çok daha ciddi oranda olumsuz etkileyebileceğini göz ardı etmemek gerekir. Ülkenin sahip olduğu fosil enerji kaynakları enerji ihtiyacını karşılayacak düzeyde olmayıp, mevcut linyit kömürleri hem düşük ısı değerli hem de yüksek kükürt ve kül içeriğine sahiptir. Bu nedenle temiz, yerli ve yenilenebilir enerji

kaynaklarının kullanımı Türkiye için çok önemlidir. Ayrıca, Türkiye coğrafi yapısı ve geniş üretim alanları ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı açısından avantajlı bir konumdadır.

Türkiye'nin yüksek oranda dışa bağımlı olduğu enerji kaynaklarına alternatif teşkil edebilecek yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli, ülkenin içinde bulunduğu enerji darboğazının aşılmasına, ithal enerji girdilerine olan bağımlılığın azalmasına ve bu sayede oluşan döviz kaybının önlenmesine yönelik önemli bir kaynak teşkil etmektedir (Bayrak ve Esen 2014).

Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları açısından büyük bir potansiyele sahip olmasına karşın, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki ve arzındaki payı oldukça düşüktür. Ülkemizin teknik ve ekonomik açıdan mümkün olan yenilenebilir enerji kaynakları potansiyelinin (380 MTEP), 2012 yılı toplam birincil enerji arzından (121 MTEP) çok fazla olduğu görülmektedir (Acaroğlu, 1998). Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretimdeki payı 1990 yılı için %38, 2000 yılı için %38.7 ve 2012 yılı için ise %34.7 düzeylerinde olurken, toplam birincil enerji arzındaki payları ise 1990 yılı için %18.3, 2000 yılı için %12.8 ve 2012 yılı için %9.9 olmuştur. Enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları arasında ise biyokütle enerjisinin payı 1990 yılı için %74.6, 2000 yılı için %64 ve 2012 yılı için %29 olmuştur. Biyokütle enerjisi, toplam enerji üretimindeki payının yıldan yıla düşüş göstermiş olmasına rağmen, yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidroelektrik enerjiden sonra en yüksek paya ve dolayısı ile büyük bir öneme sahiptir. Biyokütle enerjisinin toplam enerji üretimindeki payı 2012 yılı için %10.1 iken, toplam birincil enerji arzındaki payı ise aynı yıl için %2.9 gibi oldukça düşük seviyede kalmıştır.

Türkiye'nin geri kazanılabilir biyokütle potansiyeli yaklaşık olarak 16.92 MTEP olarak tahmin edilmektedir (Kaygusuz ve Türker 2002). Türkiye 2013 yılı geçici verilerine göre yaklaşık 20 milyon hektar işlenen tarım alanı ile tarımsal potansiyeli zengin olan bir ülkedir. Bu alanların 15.6 milyon hektar bölümü ekilirken, geri kalan alan ise nadasa bırakılmıştır (TUİK 2014).

Tarımsal üretim alanlarında yaygın olarak tahıllar, yağlı tohumlar ve yumrulu ürünler yetiştirilmektedir. Bu ürünler içerisinde, üretim alanına bağlı olarak, en yüksek artık miktarı buğday ve arpa yetiştiriciliğinden açığa çıkmaktadır. Bununla birlikte, mısır ve pamuk yetiştiriciliğinden de önemli miktarda artık oluşmaktadır. Türkiye'de yıllık toplam tarımsal artıkların enerji eşdeğeri 50-65 MTEP'dir. Türkiye'de kullanılabilir tarımsal artıkların miktarı 13 milyon ton civarındadır ve bu artıkların ısı enerjisi değeri yaklaşık olarak 228 PJ'dur. Toplam kullanılabilir artık içerisinde mısır %31.72, buğday %27.01 ve pamuk %16.12 ile en fazla paya sahip başlıca ürünlerdir. Bölgeler içerisinde tarla ürünleri artıklarının toplam ısı değeri açısından en büyük pay 57 PJ ve %25 oran ile Akdeniz Bölgesine aittir (Başçetinçelik vd 2005). Mevcut durumda tarla bitkileri atıklarından sağlanabilecek enerji miktarı, Türkiye'nin 2004 yılı birincil enerji tüketiminin %6'sını karşılayabilmektedir (Gizlenci vd 2012).

Türkiye'de klasik biyokütle kullanımı, enerji üretiminde büyük rol oynamaktadır. Klasik biyokütle kaynakları içerisinde yer alan odun, tarımsal ve hayvansal artıklar özellikle kırsal alanlarda sobalarda ve şöminelerde yemek pişirme ve

ısıtma ihtiyaçları için yıllardır doğrudan yakılırken, modern anlamda biyokütleden enerji üretimine ise yeni yeni geçilmekte ve bu amaçla sadece sıvı yakıtlar (biyo-benzin ve biyo-motorin) kullanılmaktadır.

Ülkemizde çoğunlukla, ekonomik olmayan bir yöntem olan biyokütlenin doğrudan yakılarak değerlendirilmesi yoluna gidilmektedir. Ancak son yıllarda, biyokütlenin biyoyakıt eldesinde kullanımı geliştirilmeye başlanmıştır (Topal ve Arslan 2008).

Çizelge 2.3'te Türkiye'nin mevcut ve planlanan biyokütle enerji üretimi verileri verilmiştir (DEK-TMK 2000, Acaroğlu ve Ültanır 2000).

Çizelge 2.3. Mevcut ve planlanan biyokütle enerji üretimi (BTEP)

Yıl	Klasik biyokütle	Modern biyokütle	Toplam
2000	6965	17	6982
2005	6494	766	7260
2010	5754	1660	7414
2015	4790	2530	7320
2020	4000	3520	7520
2025	3345	4465	7810
2030	3310	4895	8205

Görüldüğü gibi klasik biyokütle kullanımının 2000–2030 yılları arasında azalacağı, buna karşın modern biyokütle kullanımının aynı dönemde artacağı planlanmıştır. Türkiye'nin 2010 yılı yıllık toplam birincil enerji üretim ve enerji arzı verilerine bakıldığında enerji üretiminde modern biyokütle kullanım planlamasının gerçekleşmediği ve klasik biyokütle kullanımının ise planlanandan daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. 2010 yılı için modern biyokütleden enerji üretimi 1660 BTEP olarak planlanmışken, 2012 yılı için bu rakam sadece ve sadece 51 BTEP gibi oldukça düşük seviyelerde kalmıştır (ETKB 2014).

Tarımsal artıklar düşük yoğunluğa ve yüksek nem içeriğine sahip materyallerdir. Bu nedenle enerji eldesi için bu artıkların doğrudan yakılması çok etkin olmamakta (çok fazla kirletici emisyon ve partikül atmosfere salınmakta), depolama ve taşıma işlemlerinde problemler ortaya çıkmakta, taşıma ve depolama maliyetleri artmaktadır.

Bu bilgiler ışığında tarımsal artıkların hem dünyada hem de ülkemizde enerji kaynağı olarak katı yakıt formunda değerlendirilmesi büyük önem kazanmaktadır. Tarımsal artıkların, özellikleri iyileştirilmiş katı enerji kaynağı olarak kullanılmasında en etkin yollardan birisi de pelet haline getirilmesi işlemidir. Son yıllarda peletlemenin önemi gittikçe artmış ve pelet kullanımı yaygınlaşmıştır.

2.3. Pelet ve Peletleme Teknolojileri

Pelet, hayvan yemine benzeyen, küçük, silindirik bir forma sahiptir. Biyokütle peletleri genellikle 6-12 mm çapında ve 10-30 mm uzunluğundadır. Biyokütle materyalinin basınç altında daha küçük boyutlara (yaklaşık 30 mm) getirilmesine

peletleme denilmektedir (Öztürk 2012). Pelet odun talaşı, odun yongaları, ağaç kabuğu, tarımsal ürünler, ekinlerin sapları, fındık, badem, ceviz kabukları hatta artık kağıt gibi maddelerden üretilebilmektedir.

Peletleme işlemi ile materyalin yoğunluğu artmakta, taşıma, depolama ve nakliye masrafları azalmakta, boyut ve şekilde homojenlik sağlanmakta, ısı amaçlı kullanımlarda yakma sistemlerine otomatik olarak beslenebilmekte ve böylelikle materyalin daha etkin bir şekilde kullanımı sağlanmaktadır (Werther vd 2000, Mani vd 2003, Holm vd 2006, Nilsson vd 2011, Theerarattananoon vd 2011, García-Maraver vd 2011, Celma vd 2012).

Günümüzde peletleme teknolojileri olarak düz ve çember kalıplı presler kullanılmaktadır (Şekil 2.2). Düz kalıp preste sıralı delikli disk üzerinde bir, iki ya da daha fazla sıkıştırma silindiri (daha çok 2 silindir) yaklaşık olarak 2-3 m/s hızla dönmektedir. Diskler vasıtasıyla materyal kalıp deliklerinde sıkıştırılmakta ve kalıbın şeklini alarak peletlenmiş olarak çıkmaktadır. Çember kalıplı preslerde ise, dönen delikli çemberin iç çevresine bastıran sıkıştırma silindirleri (normalde 2 veya 3 adet) sürekli olarak dönmektedir. Materyal kalıp deliklerinde sürekli olarak sıkışarak peletlenmiş olarak kalıptan çıkmaktadır (Öztürk 2012).



Şekil 2.2. Düz kalıplı (a) ve çember kalıplı (b) peletleme teknolojisi

Biyokütle peletlerinin fiziksel özelliklerinin bilinmesi özellikle taşıma, depolama, nakliye işlemleri ve yakma sistemleri açısından oldukça önemlidir. Peletlerin fiziksel özellikleri biçim, çap ve uzunluk olarak boyutları, yoğunluğu, porozitesi, sertliği ve dayanıklılığıdır (Balasubramanian 2000). Peletlerin uzunluk ve çap gibi boyutları yakma işlemleri ve yakma sistemlerinin tasarımı açısından oldukça önemlidir. İnce peletler özellikle küçük kapasiteli yakma sistemlerinde daha iyi bir yanma oranı sağlarken, pelet uzunluğu yakıtın otomatik olarak yakma sistemine beslenmesi açısından önem arz etmekte, daha kısa peletler daha rahat bir akış sağlamaktadırlar (Lehtikangas 2001). Pelet yoğunluğu nakliye masraflarını, taşıma ve depolama etkinliğini etkilemektedir. Daha yoğun elde edilen peletler nakliye masraflarını azaltmakta, taşıma ve depolama etkinliğini artırmaktadır (Lehtikangas 2001, Sokhansanj ve Turhollow 2004, Tumuluru vd 2011).

Peletlerin son kullanıcıya gelinceye kadar dayanıklı kalması oldukça önemlidir. Yüksek dayanıklılığa sahip peletler özellikle nakliyede, taşınmada ve depolama avantajlar sağlamaktadır (Lehtikangas 2001). Pelet dayanıklılığı değerlerinin %80 ve yukarı olması yüksek kaliteli, %70-80 arasında olması orta kaliteli ve %70'in altında

olması durumunda ise düşük kaliteli olarak değerlendirilmektedir (Tabil ve Sokhansanj 1996, Tabil ve Sokhansanj 1997).

Mani vd (2003) peletleme işlemine etkili faktörlerin hammadde nem içeriği, parçacık boyutu ve sıcaklık olduğunu belirtmişlerdir. Hammadde nem içeriği, pelet yoğunluğunun ve dayanıklılığının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Sağlam ve dayanıklı pelet üretimi için materyal neminin optimum değerinde olması gerekmekte, fakat optimum nem içeriği materyal çeşidine bağlı olarak değişmektedir. Sokhansanj vd (2005) selülozik materyallerin peletlenmesinde en uygun nemin değerinin %8-12 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Peletleme işleminde nem, parçacıklar arası bağları kuvvetlendiren bir yapıştırıcı gibi rol oynamaktadır. Organik ve selülozik ürünlerde su, parçacıkların gerçek temas yüzeylerini artırarak Van der Waals kuvvetlerinin bağlayıcı etkisini güçlendirmektedir. Ancak yine de suyun bu etkisi oldukça kritiktir ve tamamen materyal çeşidine bağlıdır.

Pelet üreticileri hammaddeyi pelet formuna dönüştürürken yağlayıcı ve yapıştırıcı maddelerden yararlanmaktadırlar. Sıklıkla kullanılan yağlayıcılardan sebze yağları, hammaddeyle kalıp arasındaki sürtünmeyi azaltmaktadır. Yağlayıcı maddeler genellikle lifli yapıda olmaları nedeniyle sert orman atıklarından pelet yapan üreticiler tarafından kullanılır (Wilson 2010).

Tumuluru (2014), mısır koçanlarıyla yaptığı çalışmada, materyale uygulanan sıcaklık ve materyal neminin içindeki protein, nişasta ve ligninin kimyasal yapılarından dolayı yapıştırıcı etkisinin arttığını belirtmiştir. Yaşar vd (2010) susam ve pamuk saplarında lignin içeriğini %23.64 ve %23.41 (k.b.) olarak tespit etmişlerdir. Yüksek nem içeriği, materyalin sıkıştırma deliklerinden daha kolay kaymasına neden olmakta ve bu durum pelet kalitesini oldukça düşürmektedir. Rehkuglar ve Buchele (1969), yem peletlerinde hammadde neminin arttığında pelet yoğunluğunun düştüğünü gözlemlemiştir.

Düşük nem içeriği ise peletleme işlemi için çok büyük basınç gerektirmekte ve bu da düşük basınçlarda materyalin kalıp deliklerinde sıkışıp kalmasına neden olmaktadır. Böyle bir durumun meydana gelmesi peletleme işlemini durdurmakta ve önemli zaman kayıplarına neden olmaktadır (Lehtikangas 2001).

Materyal parçacık boyutu (ortalama ve dağılım) sıkıştırma süresince elde edilen peletlerin kalitesini son derece önemli derecede etkilemektedir (Lehtikangas 2001, Mani vd 2003). Parçacık boyutunun azalması materyalin toplam yüzey alanını, gözeneklik boyutunu ve sıkıştırma işleminde parçacıkların yapışması için temas eden nokta sayısını artırmaktadır. İyi bir pelet kalitesi için parçacık boyutunun, %10-20'sinin oldukça küçük partiküllerden oluşması koşulu ile, 6-8 mm arasında olması gerekmektedir (Grower ve Mishra 1996). Çünkü daha küçük parçacıklar daha büyük parçacıkların boşluklarını doldurmakta ve böylece daha yoğun ve daha dayanıklı sıkışmış ürünler elde edilebilmektedir. Zafari ve Kianmehr (2013) 0.3-0.9 ve 1.5 mm parçacık boyutlarındaki materyalle yapılan peletlemede, en düşük parçacık boyutundan daha kaliteli pelet elde etmişlerdir. Oldukça kaba parçalanmış materyaller peletleme işlemi sırasında doğal çatlakların oluşmasına, bu durum da peletlerin oldukça dayanıksız olmasına neden olmaktadır. Yüksek kaliteli bir pelet üretimi için, biyokütlenin öğütülmesinde kullanılan

çekimli değirmenin 3.2-4 mm çap aralığında eleklerle sahip olması gerekmektedir. Daha yüksek elek delik çapına sahip çekimli değirmenlerle öğütülen materyallerden elde edilen peletlerin ise daha düşük kaliteli oldukları belirtilmiştir (Mani vd 2004).

Peletleme işleminde sıcaklık ürünlerin stabilitesinde, dayanıklılığında ve sıkıştırma için gereksinim duyulan enerji miktarında büyük bir rol oynamaktadır. Materyale ısı ilavesi sıcak buhar, hammaddenin ön ısıtılması veya kalıp bölümüne ısıtma sisteminin eklenmesiyle mümkün olmaktadır (Mani vd 2003). Hammaddelere yüksek sıcaklıkta buhar ilave edilmesi pelet dayanıklılığını artırmakta ve peletleme işlemi için ihtiyaç duyulan enerji tüketimini azaltmaktadır. Tabil ve Sokhansanj (1996) tarafından yapılan bir çalışmada hammadde sıcaklığının 65°C'den 95°C'ye çıkarılmasının pelet kalitesini artırdığı belirtilmiştir. Tumuluru (2014), materyal nem içeriği %33-34 iken ön ısıtma sıcaklığını 70°C üzerine çıkardığında, daha düşük nem içeriği ve daha yüksek ön ısıtma işlemi uygulanan peletlere göre daha kaliteli peletler elde etmiştir.

Sıcaklık artışı aynı zamanda kalıp yüzeyi ile materyal arasındaki sürtünmeleri minimuma indirmekte ve peletleme işleminin daha akıcı olmasını sağlamakta, böylece makinenin peletleme kapasitesi artmaktadır (Colley 2006). Ancak, sıcaklık hiçbir zaman biyokütlenin bozulma sınırı olan 300°C'yi aşmamalıdır (Grover ve Mishra 1996).

2.4. Kaynak Taramaları

Biyokütlenin peletlenmesi ile ilgili olarak yürütülen birçok araştırmada, farklı materyaller ve peletleme makineleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ortaya konmuştur.

Gürbüz vd (2003) tarafından, melasın diğer pelet bağlayıcılar ile pelet kalitesine olan etkisini karşılaştırmak için yapılan çalışmada, 6 mm elek çapına sahip çekimli değirmende öğütülmüş karma yem materyaline melas, lignobond, aquaküp bağlayıcıları sırasıyla, %2.45, %0.30 ve %0.50 oranında eklenmiştir. Farklı pelet bağlayıcılarla elde edilen peletlerin makina kapasiteleri sırasıyla 3.03t/h, 3.9 t/h ve 3.6 t/h; kalite-kontrol etkinlikleri 3.29, 3.95, 3.61; özgül enerji tüketimi 9.29 kWh/t, 24.44 kWh/t, 26.84 kWh/t; pelet dayanıklılıkları %96.50, %96.70 ve %96.85; ufalanma oranları %3.50, %3.30 ve %3.15 olarak bulunmuştur. Kuzu besi karma yemlerinde pelet bağlayıcı olarak kullanılan melas, lignobond ve aquaküp arasında pelet kalite kriterleri bakımından çok önemli bir farklılık görülmemiştir. Wilson (2010), Pfost (1964), Tabil ve Sokhansanj (1996) göre yaygın olarak kullanılan yapıştırıcı maddelerin, yem endüstrisinde kullanılan, kalsiyum lignosülfonat, koloit, bentonit, nişasta, protein ve kalsium hidroksit olduğunu bildirmiştir.

Colley (2006) tarafından yapılan çalışmada bir enerji bitkisi olan darı bitkisi (Switchgrass) peletlenmiş ve elde edilen peletlerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada darı bitkisinin peletlenebilirliği, pelet yoğunluğu ve makinenin özgül enerji tüketimleri üzerine hammadde nem içeriği, sıcaklık ve kalıp boyutlarının etkileri incelenmiştir. Çalışma sonunda 3924 N bir sıkıştırma kuvveti ile pelet yoğunluğunun hammadde parçacık boyutunun azalması (7.9 mm'den 4.8 mm'ye) ile arttığını göstermiştir. Aynı zamanda sıcaklığın artması (60-90°C) pelet yoğunluğunu artırmıştır.

Sıcaklık artışının makinanın özgül enerji tüketimi üzerine herhangi bir etkisinin olmadığı saptanmıştır. Elde edilen peletlerin yoğunluğu $850-1250 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmiştir. Nem içeriği; peletlerin sertliğini, dayanıklılığını, pelet yığın yoğunluğunu ve parçacık yoğunluğunu önemli derecede etkilemiştir. Peletlerin koparılması için ihtiyaç duyulan kuvvet %6.32 nem içeriğinde 32 N, %17.4 nem içeriğinde ise 22 N olmuştur. En yüksek pelet dayanıklılığı %8.62 nem içeriğinde elde edilmiştir. Depolama süresince çevre havanın bağıl nemi peletlerin nem absorbe etmesini önemli derecede etkilemiştir.

Mani vd (2006) tarafından yapılan çalışmada buğday samanı, arpa samanı, mısır koçanı ve darı bitkisi materyalleri peletlenmiş ve peletlerin mekanik özellikleri üzerine farklı sıkıştırma kuvveti, parçacık boyutu ve nem içeriğinin etkileri araştırılmıştır. Öğütülmüş biyokütle örnekleri 5 farklı sıkıştırma kuvvetinde (1000, 2000, 3000, 4000 ve 4400 N), 3 farklı parçacık boyutunda (0.8, 1.6 ve 3.2 mm) ve 2 farklı nem içeriğinde (%12 ve %15) peletlenmiştir. Çalışma sonunda en yüksek pelet yoğunluğu (1136 kg/m^3) mısır koçanı örneklerinin %12 nem içeriğinde ve 3.2 mm parçacık boyutunda düşük sıkıştırma kuvveti uygulanarak elde edilmiştir. Mısır koçanındaki yüksek protein düşük sıkıştırma kuvvetlerinde dahi açığa çıkan yüksek sıcaklığın etkisi ile eriyerek yapıştırıcı görevi görmüştür. Sıkıştırma kuvveti, materyal parçacık boyutu ve nem içeriği peletlerin yoğunluğunu önemli derecede etkilemiştir. Materyal parçacık boyutunun azalması pelet yoğunluğunu artırırken, nem içeriğinin artması ise pelet yoğunluğunu azaltmıştır. Ancak, buğday samanında farklı parçacık boyutları pelet yoğunluğu üzerine önemli bir etki göstermemiştir. Sıkıştırma kuvvetinin artması pelet yoğunluğunu artırmıştır.

Bergström vd (2008) tarafından yapılan çalışmada orman endüstri artığı olan sarıçam talaşı peletlenmiş ve peletleme işlemi ile peletlerin fiziksel ve termokimyasal karakteristikleri üzerine hammadde parçacık boyut dağılımının etkileri araştırılmıştır. Çalışmada 300 kg/h kapasiteli yarı endüstriyel ölçekli peletleme makinesi kullanılmış ve 8 mm çapında peletler elde edilmiştir. Peletlerin fiziksel karakteristikleri ile ilgili olarak basınç dayanımı, aşınma direnci, yoğunluk, nem içeriği ve nem alma özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca peletlerin kurutma, ön piroliz, alev pirolizi, karbonlaşmış yanma ve karbonlaşma verimi gibi termokimyasal karakteristikleri farklı deneysel şartlar altında belirlenmiştir. Çalışma sonunda parçacık boyut dağılımının güç tüketimi ve basınç dayanımı üzerine etkisinin az olduğu, pelet yoğunluğu, nem içeriği, nem alma ve aşınma direncine belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Elde edilen peletlerin yoğunluğu yaklaşık olarak 1270 kg/m^3 ve aşınma direnci %99 olarak bulunmuştur.

Fassina (2008) tarafından yapılan çalışmada yerfıstığı kabukları laboratuvar ölçekli peletleme makinesinde peletlenmiş ve 4.76 mm çapında peletler elde edilmiştir. Peletleme öncesi örneklerin sıcak buhar ile nemlendirilerek sıcaklığı yükseltilmiştir. Peletlerin fiziksel özellikleri (pelet boyutu, pelet yığın ve parça yoğunluğu, pelet nem alma ve pelet eşdeğer nem içeriği) üzerine pelet nem içeriğindeki (yaş bazda %4.2-21.2) değişimin etkisi belirlenmiştir. Peletleme işleminden sonra peletler farklı nem içeriklerine getirilmiş (%4.2, %9.1, %12.3, %15.4 ve %21.2) ve pelet fiziksel özellikleri bu işlemten sonra belirlenmiştir. Çalışma sonunda pelet yığın ve parça yoğunluğunun nem içeriğindeki artış ile doğrusal olarak azaldığı belirlenmiştir. Peletleme işlemi ile hammaddenin hacim yoğunluğu 151 kg/m^3 'ten 600 kg/m^3 'e çıkmıştır. Peletlerin

dayanıklılığı başlangıçta nem içeriğinin artışı ile artmış ve %9.1 nem içeriğinde %90.3 ile maksimum değere çıkmıştır. Nem içeriğinin daha da fazla artması pelet dayanıklılığını azaltmış ve %21.2 nem içeriğinde %76 ile en düşük olmuştur. Çevre sıcaklığına bakılmaksızın, peletlerin %60-80 nem içeriğine sahip bir ortamda nem aldığı, fakat %45 nem içeriğine sahip bir ortamda nem kaybettiği görülmüş ve peletlerin 48 saatlik bir sürede nemlendirilmiş hava ile temas ettiğinde en fazla %4.9'a kadar nem absorbe ettiği belirlenmiştir.

Gil vd (2010) tarafından yapılan çalışmada farklı biyokütle (çam, kiraz ve okaliptüs talaşları, selüloz artıkları, kahve kabukları ve üzüm artıkları) örnekleri ve biyokütle örnekleri + iki farklı kömür çeşidi karışımından hazırlanan örnekler peletlenmiştir. Çalışmada peletleme makinası olarak kalıp-piston düzeneği kullanılmış ve 8 mm çapında silindirik peletler üretilmiştir. Pelet üretiminde kullanılan hammadde özelliklerinin optimum değerlerinin belirlenmesi için peletlerin mekanik özellikleri ve yanma davranışları sırası ile aşınma indeksi ve termogravimetrik analiz yardımıyla incelenmiştir. Çalışma sonunda üzüm artığı ve kahve kabuklarından elde edilen peletlerin en düşük, kiraz ve çam talaşından elde edilen peletlerin ise en yüksek dayanıklılığa sahip oldukları belirlenmiştir. %10-30 arasında kiraz talaşı ile çam talaşı karışımlarının pelet üretimi için en iyisi olduğu görülmüştür. Kiraz + çam talaşı ile selüloz artıkları + kömür (<%20) karışımlarından elde edilen peletlerin dayanıklılığında bir azalma olmamıştır. Biyokütle + biyokütle karışımlarından elde edilen peletler ile peletlenmemiş hammaddenin yanma profilleri benzerlik göstermiştir. Biyokütle örneklerine az miktarlarda kömür eklenmesi karışımların ısı karakteristiklerini etkilememiştir.

Razuan vd (2011) tarafından yapılan çalışmada hurma yağı fabrikalarından çıkan hurma çekirdeği küspesi peletlenmiş ve peletlerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada 2.5 mm ortalama çapa ve %7.9 nem içeriğinde sahip hurma çekirdeği küspeleri maksimum sıkıştırma basıncı 70 MPa olan peletleme makinesinde 5 saniye süre ile 20-100°C arasındaki sıcaklıklarda peletlenmiştir. Yoğunluk ve çekme dayanımı üzerine önemli etkilere sahip peletleme basıncı, sıcaklık, nem içeriği ve yapıştırıcı madde gibi değişkenlerin etkileri incelenmiştir. Çalışma sonunda pelet yoğunluğunun 1184-1226 kg/m³ ve çekme dayanımının 930-1007 kPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Aynı şartlar altında yapıştırıcı madde olarak az miktarlarda sodyum hidroksit eklenmesinin (%1.5-2) çekme dayanımını 3055 kPa'a çıkartmıştır. Yüksek nem içeriğinde (%15) yapılan peletleme işleminde elde edilen peletlerin hemen dağıldığı, düşük nem içeriğinde (%5) yapılan peletleme işleminde elde edilen peletlerin ise hemen kırıldığı belirlenmiştir. Peletleme basıncının ve sıcaklığın artması hem pelet yoğunluğunu hem de çekme dayanımını artırmıştır. Ayrıca, %2 sodyum hidroksit katkılı hurma çekirdeği küspesi peletlerin üretim maliyetinin 28-47 £/t arasında değiştiği hesaplanmıştır.

Serrano vd (2011) tarafından yapılan çalışmada arpa samanı ve saman + çam talaşı karışımı düz kalıp dairesel sıralı delikli peletleme makinesinde peletlenmiş ve peletleme işlemi süresince kalıp sıcaklığı ölçülmüş ve materyal nemi kalıp girişinde hassas bir şekilde kontrol edilmiştir. Elde edilen peletlerin mekanik dayanımı, yoğunluğu, uzunluğu ve nem içeriği belirlenmiş ve bu parametreler pelet ısı değeri ve kül içeriği ile birlikte değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda hammadde bileşiminin az da

olsa peletleme işlemi ile değiştiği görülmüştür. Yüksek yoğunluklu arpa samanı peleti üretimi için optimum nem içeriğinin %19-23 arasında olması gerektiği belirlenmiş ve elde edilen peletlerin nem içeriğinin %6.1-8.2 arasında değiştiği görülmüştür. Hammadde nem içeriğinin artması peletlerin mekanik dayanımını ve pelet uzunluğunu artırırken, pelet yoğunluğunu azaltmıştır. Sadece arpa samanından elde edilen peletlerin mekanik dayanıklılığı %95.5 ve arpa samanına az miktarlarda çam talaşı eklendiğinde (yaş bazda %2, 7 ve 12) bu değer %97-98 olmuştur. Pelet yoğunluğu 1300-1400 kg/m³ arasında elde edilmiştir. Ayrıca peletleme işlemi arpa samanının net ısı değerinde küçük bir azalma meydana getirmiş ve arpa samanına çam talaşının eklenmesi peletlerin kül içeriğini düşürmemiş ve %10 civarında elde edilmiştir. Bu değer odunsu olmayan peletler için verilen %5 üst sınırın üstünde olduğu belirtilmiştir.

Ståhl ve Berghel (2011) tarafından yapılan çalışmada peletlerin daha çok odun talaşı ve yongalarından elde edildiği, bu materyallerin maksimum ölçüde kullanıldığı belirtilmiştir. Ancak, gelecekte pelete olan talebin artacağı ve pelet üretiminde kullanılacak talaşın yetersiz kalacağı bu nedenle diğer hammaddelerin ya da bunların karışımlarının kullanılacağı vurgulanmıştır. Yapılan çalışmada odun talaşı ile kolza küspesinin karışımı incelenmiş, karışım maddesi bir pelet makinesi kullanılarak peletlenmiştir. Elde edilen peletlerin mekanik dayanımı, uzunluğu, nem içeriği ve yığın yoğunluğu belirlenmiştir. Pelet üretimi boyunca, yük akımı, kalıp basıncı ve kalıp sıcaklığı diğer parametrelerle birlikte ölçülmüştür. Çalışmanın ana amacının çam talaşı ve kolza küspesi karışımının peletleme makinesinin enerji tüketimini ve peletlerin mekanik dayanıklılığını nasıl etkilediğinin belirlenmesi olarak vurgulanmıştır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar karışım içerisindeki kolza küspesinin artışı ile küçük parçacık miktarının arttığını ve makinenin enerji tüketiminin azaldığını göstermiştir. Ancak karışımda kolza küspe miktarının artması hem peletlerin mekanik dayanımını hem de pelet yığın yoğunluğunu azaltmıştır. Sonuç olarak enerji tüketimin azalması ile mekanik dayanımda meydana gele azalma arasında kuvvetli bir uzlaşının olduğu vurgulanmıştır.

Stelle vd (2011) tarafından yapılan çalışmada farklı biyokütle örnekleri (ladın talaşı: %8.2 nem, kayın talaşı: %7.9 nem ve buğday samanı: %8 nem) peletleme makinesinde peletlenmiş ve sıkıştırma basıncı üzerine hammadde tipinin, pelet uzunluğunun, kalıp sıcaklığının, nem içeriğinin ve materyal parçacık boyutunun etkileri incelenmiştir. Çalışmada kalıp sıcaklığı 20-180°C arasında kontrol edilmiş ve 8-16 mm çaplı peletler üretilmiştir. Çalışma sonunda pelet uzunluğunun artması ile peletleme basıncının hızlı bir şekilde arttığı ve basınç artış oranının biyokütle çeşidine, sıcaklığa, nem içeriğine ve parçacık boyutuna bağlı olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık artışı, peletleme için ihtiyaç duyulan basıncı azaltmıştır. Yüksek sıcaklık, biyokütle ile kalıp yüzeyleri arasında sürtünmeleri azaltmış ve bir yağlayıcı etkisi yaparak peletlerin daha rahat çıkmasını sağlamıştır. Peletleme basıncı üzerine nem içeriğinin etkisinin tamamen materyal çeşidine bağlı olduğu belirtilmiştir. Materyal parçacık boyutundaki azalma peletleme için ihtiyaç duyulan basıncı artırmıştır. Pelet yoğunluğu üzerine peletleme basıncının etkisi incelendiğinde; 200 MPa üzerindeki sıkıştırma basınçlarının pelet yoğunluğunu sadece küçük bir oranda artırmıştır.

Theerarattananoon vd (2011) tarafından yapılan çalışmada peletleme işlemi ile materyalin yığın yoğunluğunun arttığı, depolanabilirliğinin iyileştiği, nakliye

masraflarının azaldığı ve bu materyallerin mevcut tahıllar için kullanılan depolama ve taşıma ekipmanları ile daha kolay taşınabildiği belirtilmiştir. Çalışmada mısır koçanı, buğday samanı, sorgum sapı ve büyük çimen bitkisinden elde edilen peletlerin fiziksel özellikleri belirlenmiş, peletin yığın ve parçacık yoğunluğu ve dayanıklılığı üzerine nem içeriğinin, çekiçli değirmen elek çapının ve kalıp delik uzunluğunun etkileri incelenmiştir. Materyaller 22 kW gücünde 1.5 t kapasiteli peletleme makinesinde peletlenmiştir. Çalışma sonunda en yüksek pelet hacim yoğunluğu (495.8 kg/m^3) buğday samanı peletinde, en düşük (265.2 kg/m^3) ise sorgum sapı peletinde elde edilmiştir. Materyal nem içeriğindeki artışın peletlerin hem yığın hem de parça yoğunluğunu azalttığı belirlenmiştir. Peletlerin dayanıklılığı üzerine nem içeriğinin etkisi mısır koçanı, buğday samanı ve büyük çimen bitkisi için benzer bulunmuş ve en yüksek pelet dayanıklılığı buğday samanı ve mısır koçanı peleti için %9-14 eşdeğer nem içeriği aralığında, büyük çimen bitkisinin ise %9-11 eşdeğer nem içeriği aralığında %96.8 olmuştur. Eşdeğer nem içeriğindeki bir miktar daha artışın pelet dayanıklılığını azalttığı belirlenmiştir. Sorgum sapı için ise pelet dayanıklılığı, eşdeğer nem içeriğindeki artış ile başlangıçta artmış ve %14-16 eşdeğer nem içeriği aralığında maksimum %89.5 olmuştur. Daha büyük elek çapına sahip çekiçli değirmen kullanımı (3.2 mm'den 6.5 mm elek çapı) peletlerin hacim ve parça yoğunluğunu ve dayanıklılığını artırdığı fakat bunun önemli düzeyde olmadığı belirtilmiştir. Daha büyük kalıp delik uzunluğu (31.8 mm'den 44.5 mm) peletlerin hacim ve parça yoğunluğunu ve dayanıklılığını önemli derecede artırmıştır.

Zamorano vd (2011) tarafından yapılan çalışmada zeytin ağacı, zeytin ağacı yaprakları, badem ağacı, kavak ve pırnal meşe ağaçları budama atıkları 6-8 mm aralığında öğütülmüş ve 8 mm çapında peletler elde edilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde zeytin ağacı yapraklarından yapılan peletler dışındaki diğer peletler yakın kalitede olup, zeytin ağacı yapraklarından yapılan peletlerin düşük kalitede olduğu görülmüştür. Yüksek nem içeriği, düşük pelet yoğunluğu ve pelet boylarının kısa olması peletlerin mukavemet dirençlerini düşürdüğü bildirilmiştir.

Celma vd (2012) tarafından yapılan çalışmada domates işleme tesislerinden çıkan domates biyokütle artıkları (başlıca kabuk ve tohum) kurutma işleminden sonra peletlenmiş ve 6 mm çapında peletler elde edilmiştir. Elde edilen peletlerin başta hayvan yemi olarak, likopen ekstraksiyonu ve hatta enerji üretiminde yakıt olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Çalışmada denemeler, beş farklı nem içeriğinde (yaklaşık olarak %20, 25, 29, 34 ve 38) gerçekleştirilmiş ve peletleme makinesi olarak 50 kg/h kapasiteli düz kalıp dairesel sıralı makine kullanılmıştır. Çalışma sonunda peletlerin yığın ve parçacık yoğunluğunun, pelet sertliği ve dayanıklılığının hammadde nem içeriğinden önemli derecede etkilendiği belirlenmiştir. Biyokütle başlangıç nem içeriğindeki belirli orandaki artışların (%67'ye kadar) meydana gelmesi peletlerin fiziksel özelliklerinde önemli iyileştirmeler sağlamış ve maksimum pelet yığın yoğunluğunda %50, pelet parçacık yoğunluğunda %18, pelet sertliğinde %3575 ve pelet dayanıklılığında ise %88 oranında artış meydana getirmiştir. Ancak, biyokütle nem içeriğinin %20'nin altında olması peletleme işleminin başarısız olmasına neden olmuş ve pelet fiziksel özelliklerini olumsuz etkilemiştir. En iyi peletleme işleminin gerçekleştirilebilmesi için biyokütle nem içeriğinin %34 civarında olması gerektiği belirtilmiştir. Peletlerin maksimum yığın yoğunluğunun 350 kg/m^3 olduğu

belirlenmiştir. Peletlerin dayanıklılığının, nem içeriğindeki artış ile arttığı ve %9.09 pelet nem içeriğinde %91.2 ile maksimum değere ulaştığı görülmüştür.

Larsson ve Rudolfsson (2012) tarafından yapılan çalışmada enerji bitkisi olan ve %8-15 nem içeriğine sahip kuşyemi kamışı (*Phalaris arundinacea* L.) maksimum kapasitesi 300 kg/h olan peletleme makinesi ile peletlenmiş ve pelet kalite parametreleri olan pelet yığın yoğunluğu ve pelet dayanıklılığının optimizasyonu farklı parametreler altında deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve makinenin özgül enerji tüketim değerleri belirlenmiştir. Kontrol parametreleri olarak kalıp sıcaklığı, hammadde nem içeriği ve buhar ilavesi dikkate alınmıştır. Çalışma süresince sıcaklık kontrol edilmiş ve diğer faktörler bağımsız olarak değiştirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar sürekli bir pelet üretimi için düşük bir kalıp sıcaklığının gerekli olduğunu ve yüksek pelet kalitesi elde etmek için optimizasyon ayarlarının seçiminin önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Çalışma sonunda en yüksek pelet yığın yoğunluğu düşük hammadde sıcaklıklarında ve düşük materyal nem içeriklerinde elde edilmiştir. Kalıp sıcaklığının hem pelet yığın yoğunluğuna hem de pelet dayanıklılığına etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuş, pelet yığın yoğunluğu ve pelet dayanıklılığı ile kalıp sıcaklığı arasında negatif bir ilişkinin olduğu saptanmıştır. %97.5'ten daha yüksek pelet dayanıklılığı ve 600 kg/m³'ten daha yüksek pelet yığın yoğunluğu elde etmek için parametrelerin 30°C kalıp sıcaklığı ve yaklaşık olarak 30-40°C (2-4 kg buhar/h eşdeğeri) materyal sıcaklığının olması gerektiği belirlenmiştir.

Santamarta vd (2012) tarafından yapılan çalışmada kanola bitkisinin elde edilebilir olması, nispeten yüksek ısı değer ve düşük nem içeriğinden dolayı uygun bir alternatif yakıt olduğu belirtilmiş ve kanola bitkisi samanı peletlenmiştir. Elde edilen peletlerin 48 haftalık bir depolama süresince kalite özelliklerindeki (pelet aşınma direnci, basınç dayanımı, pelet parçacık yoğunluğu ve pelet boyutları) değişimler incelenmiştir. Çalışmada hammadde nem içeriği %13.5-15.7, pelet nem içeriği ise %9.3-12.1 arasında değişmiştir. Çalışma sonunda pelet aşınma direncinin depolama süresince değişmediği, pelet parça yoğunluğu ve basınç dayanımının depolama süresinin uzunluğu ile değiştiği ve 48 haftalık depolama süresi boyunca pelet yoğunluğunun önemli derecede azaldığı belirlenmiştir. Pelet parça yoğunluğu ile hammadde nem içeriği arasında herhangi bir ilişki bulunmamıştır. Depolama süresince pelet çapında herhangi bir değişim olmazken, peletlerin uzunluğu kırılmalara bağlı olarak depolama süresinde azalmıştır. Ayrıca aşınma direnci ile diğer kalite özellikleri arasında herhangi bir ilişkinin olmadığı görülmüştür.

Liu vd (2013) tarafından yapılan çalışmada öğütülmüş bambu bitkisi öncelikli laboratuvar ölçekli peletleme makinesi kullanılarak peletlenmiş ve bambu peletlerinin özellikleri üzerine karbonlaştırma şartlarının (sıcaklık ve zaman) etkileri belirlenmiş ve ürün özellikleri değerlendirilmiştir. Peletler 180-220°C sıcaklıklarda 30-75 dakika süre ile karbonize edilmiştir. Karbonlaştırma işleminden sonra peletler 7 gün süre ile çevre şartlarında bekletilmiş ve pelet özellikleri 7 günün sonunda belirlenmiştir. Çalışma sonunda karbonlaştırma şartlarının bambu peletlerinin özelliklerini etkilediği belirlenmiştir. Birim kütle kaybı, pelet nem alma, pelet yığın yoğunluğu, pelet parça yoğunluğu, pelet ısı değeri ve yanma verimi gibi bazı özellikler üzerine karbonlaştırma sıcaklığının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunurken, karbonlaştırma zamanının etkisi önemli bulunmamıştır. Karbonlaştırma işleminden sonra nem alma, dayanıklılık,

ısı değer, yanma verimi ve ısı bırakma oranı gibi pelet özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Yine de bu sonuçlar işlem görmemiş pelet özellikleri ile karşılaştırıldığında karbonize olmuş pelet özelliklerinin düşük kaliteye sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak karbonize olmuş bambu peletlerinin katı yakıt olarak kullanılabileceği ve ticari olarak geliştirilebilir özellikte büyük potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır.

Liu vd (2013) tarafından yapılan çalışmada bambu ve çeltik sapları, parçacık boyutları 2mm ve daha düşük boyutta olacak şekilde öğütülmüştür. Öğütüldükten sonra %8.15 olan nem içeriği, önceden miktarı belirlenmiş distile su miktarı 5 kg materyale eklenerek 2 gün boyunca ağzı kapalı torbalarda bekletilmiştir. 2.günün sonunda nem içerikleri, bambuda %15.97, çeltik sapında %15.56 olarak tespit edilmiştir. Peletleme işlemi sonunda bambu ve çeltik sapı peletlerinin bir kısmı dijital sıcaklık kontrollü sobada 220°C'de 1 saat bekletildikten sonra karbonize olmuş bambu ve çeltik sapı peletleri elde edilmiştir. Bambu, çeltik sapı, karbonize olmuş bambu ve karbonize olmuş çeltik sapı peletlerine pelet fiziksel testleri uygulanmış olup pelet hacim yoğunlukları sırasıyla 540 kg/m³, 640 kg/m³, 490 kg/m³, 590 kg/m³, pelet yoğunlukları sırasıyla 1250 kg/m³, 1350 kg/m³, 1160 kg/m³ ve 1280 kg/m³ olarak bulunmuştur. Çeltik sapı peletlerinin pelet yoğunluğu ve pelet yığın yoğunluğu her iki durumda da yüksek bulunmuştur. Pelet dayanıklılık dirençleri de sırasıyla, %94.21, %98.73, %97.80 ve %99.17 değerlerinde tespit edilmiş, çeltik sapının pelet kalitesinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Zafari ve Kianmehr (2013) tarafından yapılan çalışmada, şehir atıkları, hayvan gübresi ve tarımsal atıklardan oluşturulan kompost materyali pistonlu pelet makinasıyla, %35, %40 ve %45 nem içeriklerinde, 2-6 ve 10 mm/s piston hızında 4, 5 ve 6 s sıkıştırmayla, 8, 10 ve 12 mm kalıp uzunluğunda ve 0.3, 0.9, 1.5 mm materyal parçacık boyutunda peletlenmiştir. Çalışma sonunda en dayanıklı peletler %40 nem içeriğinde hazırlanan materyalden elde edilmiştir. Düşük piston hızında yapılan peletler basınç dayanımı ve dayanıklılık bakımından diğer piston hızlarında yapılanlara göre daha kaliteli bulunmuştur. Pelet boyunun artması pelet kalitesini olumlu yönde etkilemiştir. Materyal parçacık boyutu küçüldükçe, sıkıştırma sırasında temas yüzeyi artmış ve daha iyi bir yapıştırma sağlanarak daha dayanıklı peletler elde edilmiştir.

Hoover vd (2014) tarafından yapılan çalışmada mısır koçanları 4 mm ve 6 mm elek çaplarına sahip değirmende öğütülmüştür. 10 BG gücünde pelet makinası kullanarak, kalıp dönüş hızı 40, 50 ve 60 Hz olmak üzere 3 farklı hızda ve materyale ön ısıtma işlemi yapmadan ve 70°C ön ısıtma uygulayarak peletleme işlemini gerçekleştirmiştir. Peletleme işlemi sonunda %19 ila %22 arasında tespit edilen pelet nem içeriğini düşürmek için peletler yatay bir soğutucu içinden geçirilmiştir. Bu işlemin sonunda, soğutulan peletler halen yüksek nem içeriğinde olduğu için 40°C'de 7 saat bekletildikten sonra peletlerin nem içeriği yaklaşık %9 değerine ulaşmıştır. Bu noktada pelet yoğunluğu, pelet yığın yoğunluğu, dayanıklılık direnci değerleri ölçülmüştür. Peletlerin hammaddeye göre 6 kat daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. Değişken kalıp hızları dikkate alındığında, kalıp dönüş hızının arttıkça pelet kalitesinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Montero vd (2014) tarafından yapılan çalışmada öğütülmüş mantar tıpa atıkları %7-9 nem aralığında, 0.5-1mm, 1-2mm ve 2-3mm partikül boyutlarında sınıflandırılarak, karışım yapılmadan 3 çeşit ve 5:5:0, 6:4:0, 4:6:0, 3.3:3.3:3.3, 5:0:5 karışım oranlarında 5 çeşit olmak üzere 8 farklı materyal çeşidi hazırlanarak 6 mm delik çapına sahip düz kalıplı, 10.85 kW gücünde, 300 kg/h kapasiteli pelet makinası kullanılarak peletlenmiştir. Pelet makinası rejime girdiğinde kalıp sıcaklığı termal kamerayla 70-75°C aralığında ölçülmüştür. Peletleme öncesi materyal yoğunlukları 323-379 kg/m³ aralığında değişirken, peletleme işlemi sonrası pelet yoğunlukları 692-705 kg/m³ sınırları içinde tespit edilmiştir. Pelet yoğunluk testleri sonucu en yüksek sıkıştırma oranı (1.98), maksimum dayanıklılık direnci (%98.36) ve pelet boyu (25.95 mm); karışım oranı 5:5:0 olan 0.5-1 mm ve 1-2 mm partikül boyutlarındaki materyallerin yarı yarıya karıştırıldığı oranda bulunmuştur.

Liu vd (2014) tarafından yapılan çalışmada 1.18 mm, 1.18-0.84 mm ve 0.84 mm'den küçük partikül boyutlarına öğütülmüş bambu bitkisi %8-12-16 olmak üzere 3 farklı nem içeriğinde peletlenmiştir. Elde edilen peletler fiziksel testlere ve yanma testlerine tabi tutularak materyal nem içeriği ve partikül boyutunun pelet kalitesine etkileri incelenmiştir. Nem içeriğinin pelet fiziksel özelliklerine etkisinde, %8-12-16 nem içeriklerinde sırasıyla; pelet boyları, 12.5, 12.7 ve 11.7 mm; pelet çapları, 6.1, 6.0 ve 6.0 mm; pelet parça yoğunluğu, 1050, 1140 ve 1200 kg/m³, pelet hacim yoğunluğu, 520, 620, 650 kg/m³; pelet dayanıklılık direnci, %95.07, %97.95 ve %98.38 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, pelet kalitesinin en düşük %16, en yüksek %12 nem içeren materyalde olduğu görülmüş olup pelet yoğunluğunun pelet dayanıklılığına etki eden en etkin faktör olduğu sonucuna varılmıştır.

Cubero-Abraca vd (2014) tarafından yapılan çalışmada, endüstriyel kahve posaları kurutularak 16 mm elek çapına sahip değirmende öğütülmüş, 3 silindirli pelet makinasında peletlenerek 6.12 mm çapında peletler elde edilmiştir. Peletleme işlemi sırasında makina sıcaklığı 125°C olarak ölçülmüştür. Peletleme işlemi sonunda peletlerin %10.1 nem içeriğine sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen peletler hacmi belirli bir kaba konularak tartılmış ve 600 kg/m³ pelet yığın yoğunluğu değeri bulunmuştur. Pelet yoğunluğu 1300 kg/m³ olarak tespit edilmiştir. Peletlerin nem alma direnci belirlenirken, potasyum nitrat solüsyonu içeren %21 bağıl neme sahip desikatör içine 30 adet pelet rastgele düzenle yerleştirilerek 14 gün bekletilmiştir. Test öncesi ve test sonrası ağırlıklar kaydedilerek nem alma direnci %8.10 olarak belirlenmiştir. Kırılma direnci testinde 100 peletin her biri 1m yükseklikten seramik yüzeye atılmış, 1/kırılan parça sayısı formülüyle kırılma direnci 0.95 olarak hesaplanmıştır. Basınç dayanımı testinde 60 ton kapasiteli basınç dayanım test cihazı kullanılmış ve 26.86 kg/cm² olarak hesaplanmıştır. Pelet dayanıklılık direnci %75.54 değerinde bulunmuştur. ASAE 269.4 standardına göre dayanıklılık direncinin kabul edilebilir sınırların altında olduğu görülmüştür.

Görüldüğü gibi yapılan çalışmalarda peletleme üzerine birçok bilimsel araştırma yürütülmüş, farklı biyokütle materyalleri kullanılmış ve bu çalışmalarla ilgili bilimsel çalışmalar ortaya konulmuştur. Ancak bu materyaller içerisinde tarımsal üretim alanlarından çıkan pamuk ve susam sapı biyokütle artıklarının peletleme yolu ile değerlendirilmesine ilişkin çalışmalara yeterince rastlanmamıştır. Yapılacak çalışmanın bu tür artıkların peletleme yolu ile değerlendirilmesinin önünü açacağı, bu materyaller

için optimum peletleme koşullarının belirlenmesine ve literatürdeki eksikliğin giderilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1. Materyal

Çalışmalar Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü Atölyesinde yürütülmüştür.

Çalışmada, peletlenecek materyal olarak tarımsal üretim alanlarından çıkan pamuk (*Gossypium hirsutum*) ve susam (*Sesamum indicum*) sapları kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Pamuk sapları (a) ve susam sapları (b)

Hasat sonrası toplanan pamuk ve susam saplarının nem içerikleri yaklaşık olarak sırası ile %47 ve %15 civarındadır. Öğütme ve peletleme işlemi için materyallerin uygun nem içeriğine getirilmesi son derece önemlidir. Özellikle pamuk saplarının kurutulması büyük önem taşımaktadır. Materyallerin hem kuruma süresini kısaltmak hem de çekiçli değirmende öğütme işlemlerini kolaylaştırmak için traktör kuyruk milinden hareket alan dal parçalama makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.2). Dal parçalama makinesi hareket iletim sistemi, besleme düzeni, parçalama düzeni, materyal sevk borusu ve emniyet mekanizmasından oluşmaktadır. Traktör kuyruk milinden alınan hareket kayış kasnak sistemi ile parçalama ünitesinde üzerinde bıçaklar bulunan diske iletilmektedir. Besleme tamburu hareketini traktörün hidrolik prizinden almaktadır. Besleme düzeni makinenin arka tarafında yer almakta ve üzerinde tırnaklar bulunan bir döner tamburdan oluşmaktadır. Parçalama ünitesi dönen bir disk, disk üzerine yerleştirilmiş üç adet bıçak ve bir adet karşıt bıçaktan oluşmaktadır. Ayrıca parçalanan materyalin sevk borusuna iletilmesi için disk üzerinde bıçakların ters yönüne yerleştirilmiş kanatlar bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Dal parçalama makinesi genel görünüşü

Parçalanan materyalin kurutulduktan sonra peletleme işlemi için uygun boyutlara getirilmesinde, materyal besleme ünitesi genişliği 70 cm olan, 64 bıçaklı, elek delik çapı 4 mm, motor gücü 7.5 kW ve motor devri 1450 min^{-1} olan, 4 mm eleğe sahip çekiçli değirmen kullanılmıştır (Şekil 3.3). Çekiçli değirmen çalıştığında çekiçlerin dönme çapı 380 mm, çekiç uçlarının açısal hızları 151.80 rad/s ve çevre hızları 28.85 m/s 'dir. Ayrıca çekiçli değirmen, öğütme performansının artırılması ve öğütülen materyalin çuvallama ünitesine aktarılması için motor gücü 0.8 kW, motor devri 2800 min^{-1} ve $1980 \text{ m}^3/\text{h}$ hava emiş kapasitesine sahip olan tek fazlı toz emiş fanına sahiptir.



Şekil 3.3. Çekiçli değirmen genel görünüşü ve öğütme ünitesi

Materyallerin peletlenmesinde elektrik enerjisi ile çalışan, üç fazlı, motor gücü 15 kW, kapasitesi materyal çeşidine bağlı olarak 70-100 kg/h, pelet boyu 10 - 40 mm arasında ayarlanabilen peletleme makinesi kullanılmıştır. Peletleme makinesi materyal deposu, dairesel sıralı delikli düz kalıp, sıkıştırma silindirleri, pelet boyu ayarlama ünitesi ve elektrik kontrol panosundan oluşmaktadır. Kullanılan pelet kalıbı, düze kalıp olup dairesel sıralı deliklere sahiptir. Pelet kalıbının giriş delik çapı 11 mm, çıkış delik çapı 8 mm ve kalıp boyu 25 mm'dir (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5).



Şekil 3.4. Pelet makinası genel görünümü



Şekil 3.5. Pelet makinası sıkıştırma diskleri ve kalıp

Denemelerde kullanılan pamuk ve susam bitkisi saplarının ve elde edilen peletlerin nem içeriklerinin belirlenmesinde kurutma fırını (ETÜV) kullanılmıştır (Şekil 3.6).



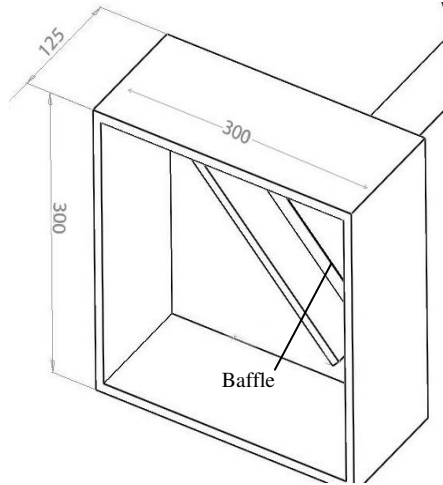
Şekil 3.6. Kurutma fırını (Etüv)

Öğütülen materyallerin parçacık boyut dağılımlarının belirlenmesinde 200 mm çapında, 50 mm derinliğinde ve 0.125, 0.30, 0.425, 0.850, 1.18, 1.7 ve 2 mm delik çaplarında 7 adet elekten oluşan elek analiz seti kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Elek analiz seti

Peletlerin dayanıklılık dirençleri EN 15210-1 (2009) standardına göre yapılmış, motor gücü 0.5 BG, motor redüktör devri 50 min^{-1} , peletlerin yerleştirileceği kafes ölçüleri 300x300x125 mm ve kafes iç merkezine çapraz simetrik olarak yerleştirilen 50 mm eninde, 230 mm uzunluğunda bir levhaya (baffle) sahip dayanıklılık test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Dayanıklılık test cihazı ve kafes ölçüleri

Peletlerin sıkıştırma direncinin belirlenmesinde 60 ton kapasiteli, üzerinde 60 tona kadar uygulanan yükleri ölçebilen yük hücresi (load cell) bulunan, valf ayarları değiştirilerek uygulama yükünün 0-60 ton arasında değiştirilebildiği ve uygulanan yüklerin anında bilgisayara aktarılıp izlenebildiği hidrolik tip test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Sıkıştırma direnci test cihazı

Peletlerin nem alma dirençlerinin belirlenmesinde sıcaklık çalışma sınırları $+10 - +60^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), nemli çalışma sınırları $\%20 - \%95$ ($\pm \%5$), zaman ayarlı, maksimum güç değeri 2.0 kW ve kullanılabilir hacmi 252 l olan İklimlendirme Test Kabini kullanılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. İklimlendirme test kabini

Materyal ve pelet örneklerinin tartılmasında maksimum kapasitesi 2.1 kg olan ve 0.01 g hassasiyetli elektronik terazi ve pelet boyutlarının ölçümünde 0.01 mm hassasiyetli dijital kumpas kullanılmıştır (Şekil 3.11).



a



b

Şekil 3.11. Elektronik terazi (a), dijital kumpas (b)

Peletleme makinesinin enerji tüketim değerlerinin ölçülmesinde Chauvin Arnaux CA 8332B 3 fazlı portatif enerji analizörü [3xAmplfex 45 Akım Klambı (10-6500A) + 3xMN93 (0-200A) ile] kullanılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Enerji analizörü

3.2. Metot

3.2.1. Materyalin peletlenmeye hazırlanması ve peletlenmesi

Tarımsal üretim alanlarından toplanan pamuk ve susam sapsarı deneme alanına getirilmiş ve kuruma süresini kısaltmak için traktör kuyruk milinden hareket alan dal parçalama makinesi ile ön parçalanarak materyal boyutu 1-5 cm boyutlarına getirilmiştir (Şekil 3.13).



a



b

Şekil 3.13. Parçalanmış susam (a) ve pamuk sapsarı (b)

Parçalanmış pamuk ve susam sapsarı dış ortamda sert zemin üzerine serilmiş ve doğal olarak kurumaya bırakılmış, yaklaşık bir haftalık süre sonunda materyal nem içerikleri ortalama %10 değerlerine düşmüştür. Kurutma işleminden sonra materyaller 4 mm elek delik çapına sahip çekiçli değirmende öğütülerek peletleme işlemi için uygun boyutlara getirilmiş ve peletleme işlemine kadar hava almayacak şekilde kapalı plastik ambalaj içinde depolanmıştır (Şekil 3.14).



a



b

Şekil 3.14. Öğütülmüş susam (a) ve pamuk sapsarı (b)

Peletleme denemelerine geçmeden önce her bir materyal için farklı nem içeriklerinde (%10, %15 ve %20) ön peletleme işlemi gerçekleştirilmiş ve çok düşük kaliteli peletler elde edilmiştir. Mevcut kalıp sisteminde pamuk ve susam sapsarı ile farklı nem içeriklerinde kaliteli pelet üretimin gerçekleştirilmesinin mümkün olamayacağı görülmüş ve yapıştırıcı materyal olarak melas kullanılmasına karar verilmiştir. Melas, yaygın olarak kullanılan pelet bağlayıcılardan birisidir. Gürbüz vd (2003) tarafından melasın peletleme işleminde bağlayıcı etki yaptığı ve pelet bağlayıcı içermeyen karma yeme göre, yemin pelet presinden geçiş miktarını da arttırdığı bildirilmiştir. Şeker fabrikalarından şeker üretimi sonucu ortaya çıkan bir materyal olan sıvı melas temin edilmiş ve farklı melas oranlarında (%1-10) tekrar ön denemeler

gerçekleştirilmiş, en iyi pelet özelliklerinin %7.5 melas karışımında elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu aşamadan sonra materyal nem içeriklerini yaklaşık %15 ve %20'ye çıkartmak için su ile nemlendirme işlemi yapılmış ve nemlendirme işlemi sonucu materyal içerisinde nem stabilizesinin sağlanması için materyaller hava almayacak şekilde 7 gün süresince kapalı plastik ambalaj poşeti içerisinde bekletilmiştir. Materyal nemini %10'dan %15 ve %20 nem içeriğine çıkartmak için eklenmesi gereken su miktarı aşağıda verilen eşitlik yardımı ile hesaplanmış (Coşkun, Yalçın ve Özarslan 2005), materyal içerisine su sprey şeklinde püskürtülmüş ve materyal bir karıştırıcı yardımı ile karıştırılmıştır.

$$Q = W_i(M_f - M_i)/(100 - M_f) \quad (3.1)$$

Eşitlikte;

Q : Eklenecek su miktarı (g);

W_i : Materyalin ilk ağırlığı (g);

M_i : Materyalin ilk durumdaki nem içeriği (%);

M_f : Materyalin son durumdaki nem içeriği (%)

Nemlendirme işleminin 7. gün sonunda deneme materyallerin hazırlanması için sıvı melas hazırlanmıştır. Sıvı melas, viskozitesi oldukça yüksek bir materyal olduğu için yaklaşık 70°C'ye kadar ısıtılmış ve akışkan hale getirilmiştir. Her bir deneme materyali için 15 kg materyal ve 1.125 kg sıvı melas (%7.5) hazırlanmış ve sıvı melas materyallerin içerisine sprey şeklinde püskürtülmüş ve materyal bir karıştırıcı ile homojen bir dağılım için yeniden karıştırılmıştır. Denemelerde kullanılan materyallerin özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Demelerde kullanılan materyallerin fiziksel özellikleri

Materyal	Yoğunluk (kg/m ³)	Geometrik ortalama çap (mm)			Nem içeriği (%)			
Pamuk sapı	230	0.443		P1	10.70			
				P2	15.13			
				P3	20.37			
Susam sapı	189	0.722		S1	10.67			
				S2	14.88			
				S3	20.22			
Elek Analizi								
	0 - 0.125	0.125-0.30	0.30-0.425	0.425-0.850	0.850-1.18	1.18-1.7	1.7-2	>2
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Pamuk sapı	12.72	14.80	7.70	29.54	19.49	7.31	2.40	6.04
Susam sapı	6.11	6.66	3.97	22.23	30.40	19.34	6.33	4.96

Deneme materyalleri ile peletleme işlemine geçmeden önce, 5 kg materyal + 0.5 l motor yağı karışımı kalıp sıcaklığının kaliteli pelet üretimi için yükseltilmesinde kullanılmış ve yaklaşık 15 dakika bu materyal ile çalışarak kalıp yaklaşık 70-80°C sıcaklığa yükseltilmiştir. Bu işlemden sonra deneme materyalleri pelet makinesinde kalıp ve diskin bulunduğu materyal deposuna sürekli olarak bir kürek yardımı ile elle beslenmiştir. Kısa bir süre içerisinde kalıp deliklerindeki kesit daralmasına bağlı olarak

materyal sıkışmaya başlamış ve silindirik peletler sürekli olarak çıkmaya başlamıştır (Şekil 3.15, Şekil 3.16). Üretilen peletlerin uzunluğu, ortalama 3-4 cm olacak şekilde, kalıp altında bulunan ve sıkıştırma diski ile birlikte dönen bir bıçak mekanizması ile ayarlanmıştır. Deneme materyali ile peletleme işlemi bittikten hemen sonra kalıp sıcaklığı ölçülmüş ve materyal çeşidine ve materyal nem içeriğine bağlı olarak kalıp sıcaklığının yaklaşık 100-110°C değerlerine çıktığı görülmüştür (Şekil 3.17). Ayrıca peletleme işlemi sonrası sıkıştırıcı disk sökülerek tüm kalıp delikleri tamamen bir matkap yardımı ile açılmıştır. Her bir deneme materyali için aynı işlemler tekrarlanmış ve peletleme denemeleri tamamlanmıştır.



P1



P2



P3

Şekil 3.15. Elde edilen pamuk sapı peletlerinin görünümü



S1



S2



S3

Şekil 3.16. Elde edilen susam sapı peletlerinin görünümü



Şekil 3.17. Peletleme işlemi sonrası kalıp sıcaklığı

3.2.2. Materyal parçacık boyut dağılımı

Öğütülmüş pamuk ve susam saplarının geometrik ortalama çapları ASAE S319.3 (2003) standardına göre belirlenmiştir. Bu test için 0.125-2 mm aralığında elek açıklığına sahip 7 elekten oluşan elek analiz cihazı kullanılmıştır. Her materyal için yaklaşık 100 g örnek en üstteki eleğe konulmuş ve örneklere 10 dakika süreyle titreşim uygulanmıştır. Test sonunda her bir elek üzerinde kalan materyal tartılmış ve ağırlığı kaydedilmiştir. İki elek arasında kalan materyal yüzdesi elek üzerindeki materyal ağırlığının toplam örnek ağırlığına oranlanması ile hesaplanmıştır. Elek analizi sonrası, öğütülmüş pamuk ve susam saplarının 0.125, 0.30, 0.425, 0.850, 1.18, 1.7 ve 2mm açıklığa sahip elekler üzerinde kalan materyallerin görünüşleri Şekil 3.18 ve Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.18. Elek analizi sonrası öğütülmüş pamuk saplarının boyut dağılımı



Şekil 3.19. Elek analizi sonrası öğütülmüş susam saplarının boyut dağılımı

3.2.3. Makine kapasitesi ve enerji tüketimi

Çalışmada her bir materyal çeşidi ve farklı nem içerikleri için peletleme makinesinin kapasitesi belirlenmiş, elektrik enerjisi tüketim değeri ölçülmüş ve makine

kapasitesi ve elektrik enerjisi tüketim değerlerine bağlı olarak özgül elektrik enerjisi tüketim değerleri hesaplanmıştır.

Peletleme makinesinin kapasitesi, makine rejime girdikten (peletler çıkmaya başladıktan sonra) belirli bir süre için peletleme makinesinden çıkan peletler bir kaptan toplanmış ve daha sonra elde edilen peletler tartılmıştır. Makine kapasitesi, pelet ağırlığının peletleme için geçen süreye bölünmesi ile kg/h olarak belirlenmiştir.

Peletleme makinesinin elektrik enerjisi tüketimi 3 fazlı portatif enerji analizörü kullanılarak belirlenmiştir. Enerji analizörü bir sistemdeki akım, gerilim ve güç gibi elektriksel parametrelerin ölçülmesi için tasarlanmış olan bir cihazdır. Peletleme makinesinin enerji tüketim değerinin belirlenmesi için makinenin faz-faz arası gerilim değerleri, her fazdan çekilen akım, aktif-reaktif (kapasitif ve endüktif) ve görünür güç değerleri, $\cos\phi$ ve $\tan\phi$ faktörü değerlerinin ölçümü yapılarak makinenin güç tüketimi belirlenmiştir. Elde edilen veriler cihaz üzerinden bilgisayara aktararak kaydedilmiştir.

Makinenin özgül elektrik enerjisi tüketim değeri ise elektrik enerjisi tüketim değerinin makine kapasitesine oranlanması ile kWh/kg olarak hesaplanmıştır.

Makine kapasitesi ve elektrik enerjisi tüketimi ile ilgili denemeler üç tekerrürlü olarak yapılmış ve ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

3.2.4. Pelet fiziksel özellikleri ve testler

Pelet fiziksel özellikleri ile ilgili olarak peletlerin yoğunluğu, dayanıklılık direnci, sertliği, nem içeriği, nem alma direnci belirlenmiştir. Fiziksel testler öncesinde peletler 7 gün süre ile 22°C ve %60 bağıl neme sahip kapalı ortamda çevre şartlarında bekletilmiştir. Dayanıklılık direnci ve kırılma direnci testi sonrasında peletler 3.15 mm elek delik çapına sahip elekte elenmiş ve elek üzerinde kalan parçalar kayıp olarak değerlendirilmemiştir.

Pelet kalitesi ile ilgili bütün testler 3 tekerrürlü olarak yapılmış ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır.

3.2.4.1. Pelet parça yoğunluğu

Pelet parça yoğunluğu (particle density), pelet boyutlarının ölçülmesi (stereometrik yöntem) yolu ile belirlenmiştir. Pelet parça yoğunluğunun belirlenmesi için her pelet örneğinden 40 adet pelet rastgele seçilmiş ve tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Daha sonra silindirik peletlerin çapı ve uzunluğu 0.01 mm hassasiyetli dijital kumpas yardımı ile ölçülmüş ve pelet hacmi hesaplanmıştır. Pelet parça yoğunluğu, pelet ağırlığının pelet hacmine bölünmesi ile kg/m^3 olarak aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır (Adapa vd 2006, McMullen vd 2004).

$$V_u = \frac{\pi d^2 l}{4} \quad (3.2)$$

$$\rho_u = m_u / V_u \quad (3.3)$$

Eşitliklerde;

V_u : Tek pelet hacmi (m^3)

d : Pelet çapı (m)

l : Pelet uzunluğu (m)

ρ_u : Pelet parça yoğunluğu (kg/m^3)

m_u : Tek pelet ağırlığı (kg)

3.2.4.2. Pelet hacim yoğunluğu

Peletlerin hacim yoğunluğu EN 15103 (2009) standardına göre belirlenmiştir. Bu yöntemde elde edilen peletler 5 l hacme (153 mm çap x 272 mm yükseklik) sahipkap içerisine yaklaşık 200-300 mm yükseklikten bir koni oluşacak şekilde tam olarak doldurulmuştur. Sonra, kap 3 kez yaklaşık olarak 150mm yükseklikten serbest olarak sert zemin üzerine bırakılmıştır. Daha sonra, düz ve uzun bir ahşap malzeme ile kabın üst kısmındaki fazla peletler kap dışına taşınmış ve kabın üst kısmındaki daha büyük boşluklar doldurulmuştur (Şekil 3.20). Pelet hacim yoğunluğu kg/m^3 olarak aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\rho_{hy} = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (3.4)$$

Eşitlikte;

ρ_{hy} : Pelet hacim yoğunluğu (kg/m^3)

m_1 : Boş kabın ağırlığı (kg)

m_2 : Pelet dolu kabın ağırlığı (kg)

V : Kabın net hacmi (m^3)



Şekil 3.20. Pelet hacim yoğunluğunun belirlenmesi

3.2.4.3. Pelet dayanıklılık direnci

Peletlerin dayanıklılık direnci EN 15210-1 (2009) standardına göre belirlenmiştir. İlk önce, pelet örnekleri 3.15 mm çaplı yuvarlak delikli elek yardımı ile elenmiş ve 500 ± 10 g pelet örnekleri test cihazında kafes içerisine yerleştirilmiştir. Sonra, 10 dakika süreyle $50 \pm 2 \text{ min}^{-1}$ 'da karıştırılarak sürekli olarak kafes içerisinde düşürülmüştür. Bu işlem her bir pelet örneği için 3 kez tekrarlanmıştır. Test sonrası peletler tamamen dışarı çıkarılmış ve 3.15 mm çaplı yuvarlak delikli elek kullanılarak

tekrar elenmiştir (Şekil 3.21). Peletlerin dayanıklılık dirençleri aşağıdaki eşitlik yardımı ile yüzde (%) olarak hesaplanmıştır.

$$D_d = \frac{m_A}{m_E} \times 100 \quad 3.5$$

Eşitlikte;

D_d : Dayanıklılık direnci (%)

m_E : Test öncesi elenmiş pelet ağırlığı (g)

m_A : Test sonrası elenmiş pelet ağırlığı (g)



Şekil 3.21. Dayanıklılık direnci testi sonrası elenen peletler

3.2.4.4. Pelet kırılma direnci

Pelet kırılma direncinin belirlenmesinde peletler içerisinde rastgele seçilen 3 adet pelet 1.85 m yükseklikten sert zemine 4 kez düşürülmüştür. Test sonunda peletler 3.15 mm yuvarlak delik çaplı elek kullanılarak elenmiştir. Test süresince oluşan ağırlık kaybına bağlı olarak pelet kırılma direnci, test sonrası pelet ağırlığının test öncesi pelet ağırlığına oranlanması yolu ile % olarak belirlenmiştir (Sah vd 1980, Khankari vd 1989, Shrivastava vd 1989).

3.2.4.5. Pelet sıkıştırma direnci

Pelet sıkıştırma direnci, peletin kırılmadan (parçalanmadan) önceki dayanabileceği maksimum kırılma yükü olarak tanımlanmakta ve sıkıştırma testi yoluyla belirlenmektedir (Kaliyan ve Morey 2009). Bu teste her pelet örneğinden 10 pelet ayrı ayrı iki plaka arasına yerleştirilmiş ve yukarıdan tek yönlü sıkıştırma kuvveti uygulanmıştır (Şekil 3.22). Uygulanan sıkıştırma kuvveti sabit oranda artarak pelet kırılıncaya kadar devam etmiş ve uygulama yükleri test süresince bilgisayara aktarılmıştır. Peletlerin sıkıştırma direnci N, peletlerin özgül sıkıştırma direnci ise sıkıştırma direncinin pelet uzunluğuna oranlanması yoluyla N/mm olarak hesaplanmıştır. Peletlerin gerilme direnci ise pelet çapı ve uzunluğuna bağlı olarak pelet yüzey alanının yarısına uygulanan basınç olarak aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır (Tabil 1996, Shaw vd 2009, Kashaninejad ve Tabil 2011).

$$\sigma_x = 2F/\pi dl \quad (3.6)$$

Eşitlikte;

σ_x : Gerilme direnci (Pa)

F : Maksimum kırılma kuvveti (N);

d : Pelet çapı (m)

l : Pelet uzunluğu (m)



Şekil 3.22. Pelet sıkıştırma direnç testi

3.2.4.6. Pelet nem içeriği

Peletlerin nem içeriği EN 14774-2 (2009) standardına göre belirlenmiştir. İlk önce, örnek kapları tartılmış ve daraları kaydedilmiştir. Sonra yaklaşık 300 g pelet örnekleri örnek kaplarına konulmuş ve tekrar tartılarak dolu kabın ağırlığı kaydedilmiştir. Pelet örnekleri sabit ağırlığa gelinceye kadar (yaklaşık 24 h) $105 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kurutma fırınında kurutulmuştur. Daha sonra, kurutma fırınından alınan pelet örnekleri 15 s içinde tekrar tartılarak ağırlıkları kaydedilmiş ve aşağıdaki eşitlik yardımı ile pelet örneklerinin nem içerikleri yaş bazda yüzde (%) olarak hesaplanmıştır.

$$M = \left[\frac{m_{p2} - m_{p3}}{(m_{p2} - m_{p1})} \times 100 \right] \quad (3.7)$$

Eşitlikte;

M :Pelet nem içeriği (% y.b)

m_{p1} : Boş kuru örnek kabının ağırlığı (g)

m_{p2} : Kurutma öncesi kuru örnek kabı ve peletlerin ağırlığı (g)

m_{p3} : Kurutma sonrası kuru örnek kabı ve peletlerin ağırlığı (g)

3.2.4.7. Pelet nem alma direnci

Peletlerin nem alma dirençlerinin belirlenmesinde iki farklı yöntem kullanılmıştır.

Birinci yöntemde; peletlerin nem alma dirençleri iklimlendirme test kabini kullanılarak belirlenmiştir. Bu testte 300 g ağırlığında pelet örnekleri iklimlendirme test kabini içerisinde 3 farklı sıcaklıkta ($15, 25$ ve $40 \pm 2^\circ\text{C}$) ve 3 farklı nem içeriğinde ($45, 60$ ve $80 \pm 5\%$) bekletilmiştir. Örnekler her bir saatte bir dışarı alınarak tartılmış ve saatlik ağırlıkları kaydedilmiş ve 1 saatlik süre zarfında pelet ağırlıklarında

0.01g'dan daha fazla bir değişim meydana gelmediği durumda test sonlandırılmıştır (Fasina 2008). Daha sonra eşitlik 3.1 yardımı ile peletlerin saatlik nem değişimleri yüzde (%) olarak hesaplanmıştır.

İkinci yöntemde ise; peletlerin nem alma dirençlerini pelet ağırlığındaki değişim yoluyla belirlemiştir Liu vd (2013). Bu testte rastgele seçilen 5 pelet kurutma fırınında $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta sabit ağırlığa gelinceye kadar (yaklaşık 24 h) bekletilmiş, kurutma sonrası peletler tartılarak ilk ağırlıkları kaydedilmiştir. Peletler daha sonra 27°C sıcaklık ve %90 nem içeriğine sahip iklimlendirme kabininde 24 h süreyle bekletilmiştir. Test sonunda peletler iklimlendirme kabininden alındıktan sonra tekrar tartılmış ve peletlerin son ağırlıkları kaydedilmiştir. Peletlerin nem alma dirençleri aşağıdaki eşitlik yardımı ile yüzde (%) olarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$P_a = \frac{(m_f - m_i)}{m_i} \times 100 \quad (3.8)$$

Eşitlikte;

P_a : Pelet örneklerinin nem alması (%)

m_i : Pelet örneklerinin ilk ağırlıkları (g)

m_f : Pelet örneklerinin son ağırlıkları (g)

Peletleme makinesi kapasitesi ve enerji tüketimi değerlerinin ve pelet kalitesi ile ilgili fiziksel özelliklerin belirlenmesi için denemeler 3 tekerrürlü olarak yapılmıştır. Uygulamalar arasındaki farklılığı belirlemek için Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Makina Kapasitesi ve Enerji Tüketimi

Pamuk ve susam saplarından farklı nem içeriklerinde elde edilen peletler için peletleme makinesinin kapasitesi, elektrik enerjisi tüketim değerleri ve varyans analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Peletleme makina kapasitesi, elektrik enerji tüketimi değerleri ve varyans analiz sonuçları

Pelet	Makina kapasitesi (kg/h)	Enerji tüketimi (kWh)	Özgül enerji tüketimi (kWh/kg)
P1	148b	20.21a ^z	0.137
P2	172b	20.22a	0.117
P3	306a	19.82a	0.065
S1	138b	22.64a	0.164
S2	182a	20.83a	0.114
S3	131b	18.40a	0.141
Önemlilik	*		

*: Aynı sütundaki değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak %5 alfa düzeyinde önemlidir.

^z: Aynı harfi taşıyan değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak önemsizdir

Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi öğütülmüş pamuk ve susam saplarından elde edilen peletler için nem içeriğinin peletleme makinesi kapasitesi üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunurken, enerji tüketim değerlerine etkisi önemsiz bulunmuştur.

Pamuk saplarından elde edilen peletler için makine kapasitesi incelendiğinde nem içeriği arttıkça makine kapasitesi artmış, en yüksek kapasite P3 peletlerinde elde edilmiştir. Daha yüksek nem içeriğine sahip P3 materyalinden elde edilen peletler kalıp içerisinden yeterince sıkışmadan, çok kolay ve seri bir şekilde çıkmış, bu da makine kapasitesinin oldukça yüksek olmasını sağlamıştır. Yaklaşık %11 ve %15 nem içeriğine sahip P1 ve P2 materyallerinden elde edilen peletler için makine kapasiteleri arasında saatte 24 kg’lık bir fark olmasına rağmen istatistiksel olarak fark bulunmamıştır.

Susam saplarından elde edilen peletler için ise en yüksek makine kapasitesi yaklaşık %15 nem içeriğine sahip S2 materyalinin peletlenmesinde elde edilmiştir. %15 nem içeriğinin altında ve üstünde yapılan peletleme işlemlerinde makine kapasiteleri birbirine yakın çıkmış ve değerler arasında istatistiksel olarak bir fark bulunmamıştır.

Enerji tüketim değerlerine bakıldığında ise materyal çeşidine ve nem içeriğine bağlı olarak peletleme makinesinin saatlik enerji tüketim değeri 18.40-22.64 kW arasında değişmiştir. Nem içeriğinin enerji tüketimi üzerine etkisi her iki materyal için istatistiksel olarak önemsiz olmasına rağmen, yine de yaklaşık %20 nem içeriğine sahip materyallerde daha düşük enerji tüketim değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak nem içeriğinin artması materyalin kalıp içerisinden geçişini kolaylaştırmış bu da enerji tüketiminin az da olsa azalmasına sebep olmuştur. Peletleme makinesinin elektrik motor

gücü 15 kW olmasına rağmen, deneme materyallerinin peletlenmesi için, mevcut şartlar altında, daha fazla güç tüketiminin gerçekleştiği görülmektedir. Peletleme makinesi üzerinde elektrik motorunun korunmasına yönelik termik şalter mevcuttur. Motorun aşırı ısınmasına bağlı olarak bu termik şalter devreye girmekte ve sistemi durdurarak elektrik motorunun yanmasını önlemektedir. Yapılan ön peletleme denemelerinde aşırı materyal yüklenmesine bağlı olarak termik şalter devreye girmiş, ancak proje denemelerinde böyle bir olumsuz durumla karşılaşmamıştır. Peletleme çalışmalarında güç tüketiminin gereğinden daha fazla olması tamamen materyal deposuna materyalin beslenmesi ile ilgilidir, çünkü materyal elle beslendiğinden gereğinden fazla besleme yapılması sıkıştırma disklerinin dönmesi için bir direnç oluşturmuş bu da makinenin güç tüketimini artırmıştır. Ayrıca, materyallere ilave edilen yapıştırıcı maddenin peletleme işlemi esnasında sıcaklıkla birlikte etkisini hemen gösterdiği hatta materyalin sıkıştırma diski ile kalıp arasına girdiği anda güçlü bir bağla birbirine yapıştığı görülmüş bu da sıkıştırma disklerinin dönmesine direnç oluşturmuş ve makinenin güç tüketimini artıran bir faktör olmuştur.

Makine kapasitesinin ve enerji tüketim değerlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi, özellikle sonuçların yorumlanması açısından doğru olmayacaktır. Bu nedenle peletleme makinesinin kapasite ve enerji tüketim değerlerinin birlikte değerlendirilebileceği değer makinenin özgül elektrik enerjisi tüketim değeridir. Makinenin özgül enerji tüketim değerlerine bakıldığında ise en düşük değerler, makine kapasitesinin en yüksek olduğu durum, pamuk sapları için P3, susam sapları için ise S2 materyallerinin peletlenmesinde elde edilmiştir. S2 materyali hariç nem içeriğinin artması peletleme makinesinin özgül enerji tüketim değerlerini düşürmüştür. Ancak, özgül enerji tüketimin en az olduğu denemelere en iyi şartlar demek doğru olmayacaktır ve özgül enerji tüketimi değerleri ile pelet kalitesi ile ilgili fiziksel test sonucu değerleri de birlikte değerlendirilmelidir.

Adapa vd (2009) ve Lu vd (2014) tarafından yapılan çalışmalarda farklı biyokütle materyalleri ve farklı oranlarda yapıştırıcı kullanılarak yapılan peletleme çalışmalarında özgül enerji tüketiminin 0.0025-0.016 kWh/kg arasında değiştiği belirtilmiştir. Görüldüğü gibi bu çalışmalarda elde edilen sonuçların çok daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak, Adapa vd (2009) ve Lu vd (2014) peletleme çalışmalarında peletleme sistemi olarak piston-silindir düzeneği kullanmışlardır.

Peletleme ünitesine materyalin otomatik ve kontrollü bir şekilde beslenmesi fazla materyal yüklenmesinden kaynaklanacak fazla güç tüketimi ve makine tıkanmaları önlenecektir. Böylelikle peletleme sisteminin daha kararlı ve kesintisiz çalışması sağlanacak ve tıkanmadan kaynaklanacak zaman kayıpları giderilecektir. Ticari pelet üretimi için, yine de oluşabilecek olumsuz durumlara karşı daha büyük elektrik motor gücüne sahip peletleme makineleri seçilmelidir.

4.2. Pelet Fiziksel Özellikleri

4.2.1. Pelet nem içeriği

Pamuk ve susam saplarından elde edilen peletlerin peletleme makinesinden çıktıktan ve 7 gün boyunca 22°C ve %60 bağıl neme sahip kapalı çevre şartlarında açık

olarak bekletildikten sonraki nem içerikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Peletlerin peletleme makinesinden çıkış ve 7.gün sonu nem içerikleri

Pelet	Nem içeriği (%)	
	Çıkış	7. gün
P1	5.84	6.91
P2	8.83	8.57
P3	14.59	13.97
S1	4.40	5.83
S2	7.03	7.26
S3	9.54	9.39

Çizelge 4.2 incelendiğinde tüm materyallerin peletleme işlemi sırasında içsel, kalıp - sıkıştırma diski arasındaki sürtünmelere bağlı olarak oluşan sıcaklık yükselmesine bağlı olarak peletleme işlemi sonunda hızlı bir şekilde nem kaybettikleri görülmüştür. En fazla nem kaybı susam sapı materyallerinde meydana gelmiş ve bu kayıp %50’den daha fazla olmuştur. P3 materyalinin peletleme makinesinden diğer materyallere göre çok fazla sıkışmadan ve kolay bir şekilde çıkması peletleme işlemi sonu nem içeriğinin en yüksek olmasına neden olmuştur. Lam vd (2011) ve Celma vd (2012) tarafından farklı biyokütle materyallerinin peletlenmesi için yapılan çalışmalarda materyal nem içeriğinin artmasının peletlerin nem içeriklerini artırdığı belirlenmiştir. Dolayısı ile elde edilen sonuçlar literatür verileri ile paralellik göstermiştir.

Peletlerin 22°C ve %60 bağıl neme sahip kapalı çevre şartlarında 7 gün bekletildikten sonraki nem içerikleri incelendiğinde ise P1, S1 ve S2 peletlerinin nem aldıkları, P2, P3 ve S3 peletlerinin ise az da olsa nem kaybettikleri belirlenmiştir. Yine de peletlerin 7 gün süreyle çevre şartlarında bekletilmeleri sonucu elde edilen nem içerikleri peletleme öncesi materyal nem içeriklerinin oldukça altında kalmıştır. Avrupa Pelet Konseyi pelet standartları ile ilgili olarak ENplus-A1 ve Enplus-A2 sınıflarının yanı sıra EN-B sınıfı olmak üzere üç farklı standart tanımlamış ve tüm standartlarda peletlerin nem içeriklerinin ≤ 10 olması gerektiği belirtilmiştir (EN 14961-2 2013). Bu sonuçlara göre P3 dışındaki peletlerin Avrupa Pelet Konseyi tarafından belirlenen standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir.

4.2.2. Pelet hacim ve parça yoğunluğu

Pamuk ve susam saplarından farklı nem içeriklerinde elde edilen peletlerin hacim ve parça yoğunluk, çap ve uzunluk değerleri ile varyans analiz sonuçları Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Peletlerin hacim ve parça yoğunluk, çap, uzunluk ve ağırlık değerleri ile varyans analizi sonuçları

Pelet	Pelet hacim yoğunluğu (kg/m ³)	Pelet parça yoğunluğu (kg/m ³)	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Ağırlık (g)
P1	695a	1368a	8.10	33.96	2.39
P2	631b	1290b	8.14	37.35	2.51
P3	430c	922c	8.97	30.59	1.72
Önemlilik	*	*			
S1	717a ^z	1275a	8.33	33.39	2.32
S2	711a	1266a	8.38	32.39	2.26
S3	570b	1163b	8.44	31.22	2.03
Önemlilik	*	*			

* Aynı sütundaki değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak %5 alfa düzeyinde önemlidir.

^z: Aynı harfi taşıyan değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak önemsizdir

Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi materyal nem içeriğinin pelet hacim ve parça yoğunluğuna etkisi her iki materyal için de istatistiksel olarak önemli bulunurken, susam sapı S1 ve S2 peletlerinin hacim ve parça yoğunluğu üzerine etkisi ise önemsiz bulunmuştur ($P < 0.05$). Materyal nem içeriğinin artması hem pamuk hem de susam sapı peletlerinin hacim ve parça yoğunluğunu düşürmüştür. Pamuk ve susam sapı peletleri için en yüksek hacim yoğunluğu S1 peletlerinde, en yüksek pelet parça yoğunluğu ise P1 peletlerinde elde edilmiştir. Materyal nem içeriğinin artması ayrıca elde edilen peletlerin ortalama çaplarını artırmış, P2 peleti dışındaki peletlerin ortalama uzunluklarını ve ağırlıklarını düşürmüştür.

Öğütülmüş pamuk saplarının materyal parçacık boyut dağılımının ve buna bağlı olarak materyal geometrik ortalama çapının daha küçük olması pelet parça yoğunluklarının %10 ve %15 materyal nem değerleri için susam saplarına göre daha yüksek çıkmasını sağlamıştır. Ayrıca, materyal boyut dağılımının daha küçük olması materyallerin daha iyi sıkışmasını sağlamış ve bu durum pelet parça yoğunluğunun artmasına neden olmuştur. Peletlerin hacim yoğunlukları materyal nem içeriğine bağlı olarak materyal yoğunluğuna göre pamuk sapları için 1.9-3.0, susam sapları için ise 3.0-3.8 kat daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum pamuk ve susam sapı peletlerinin taşıma, nakliye ve depolama işlemlerini kolaylaştıracak ve masrafları azaltacaktır.

Colley (2006), Mani vd (2006), Liu vd (2014) materyal nem içeriğinin pelet parça yoğunluğu ve pelet hacim yoğunluğuna önemli derecede etki ettiğini bildirmişlerdir. Peletlerde yoğunluk parametresi pelet kalitesiyle doğrudan ilişkili olduğundan, materyal nem içeriğinin artması pelet kalitesini düşürmüş ve nem içeriğinin artması pelet yoğunluğunu azaltmıştır. Yine, Larsson ve Rudolfsson (2012) farklı nem içeriklerine sahip biyokütle materyallerinden elde ettikleri peletlerde en yüksek pelet hacim yoğunluğuna en düşük materyal nem içeriğinde ulaşmışlardır. Dolayısı ile materyal nem içeriklerin pelet hacim ve parça yoğunluğu üzerine etkisi için elde edilen sonuçlar literatür verileri ile paralellik göstermiştir.

Avrupa Pelet Konseyi tarafından pelet kalitesi ile ilgili standartlarda yoğunluk olarak hacim yoğunluğu, pelet çapı ve pelet uzunluğu ölçüt olarak dikkate alınmıştır.

Konsey tarafından belirlenen ENplus-A1, Enplus-A2 ve EN-B sınıfı pelet standartlarında pelet hacim yoğunluğunun ≥ 600 kg, pelet uzunluğunun ise 3.15-40 mm arasında olması gerektiği belirtilmiştir (EN 14961-2 2013). Her ne kadar Avrupa Pelet Konseyi tarafından verilen standartlar odun peletini kapsasa da pamuk ve susam saplarından farklı nem içeriklerinde elde edilen peletlerden hacim yoğunluğu açısından P1, P2, S1 ve S2 peletlerinin, pelet uzunluğu açısından ise tüm peletlerin standartlara uygun olduğu belirlenmiştir.

4.2.3. Pelet dayanıklılık direnci ve kırılma direnci

Dayanıklılık (aşınma) direnci peletlerin özellikle mekanik ya da pnömatik sistemlerle taşınma özelliklerinin tanımlanması açısından önemlidir ve dayanıklılık direnci testleri imalat sanayisinde sıkıştırma işleminin, dolayısı ile pelet kalitesinin kontrol edilmesine yardımcı olmaktadır. İmalat sanayisinde yüksek dayanıklılık direncine sahip peletler yüksek kaliteli peletler olarak tanımlanmaktadır (Kaliyan ve Morey 2009).

Kırılma direnci (darbe direnci ya da düşme direnci) peletlerin özellikle nakliye araçlarından boşaltılması ya da ambalaj paketlerine doldurulması esnasında karşılaşılan kuvvetlerin simülasyonu için yapılmaktadır (Kaliyan ve Morey 2009). Pietsch (2002) pelet üretiminin güvenli yüksekliğini belirlemede düşürme testlerinin kullanılabileceğini belirtmiştir.

Peletlerin dayanıklılık ve kırılma direnci değerleri ve varyans analizi sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Peletlerin dayanıklılık ve kırılma direnci değerleri ve varyans analizi sonuçları

Pelet	Dayanıklılık direnci (%)	Kırılma direnci (%)
P1	98.70a	99.90a ^z
P2	96.89b	99.94a
P3	89.86c	97.26b
Önemlilik	*	*
S1	97.16a	99.99a
S2	97.50a	99.99a
S3	93.03b	99.84a
Önemlilik	*	

*Aynı sütundaki değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak %5 alfa düzeyinde önemlidir.

^z: Aynı harfi taşıyan değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak önemsizdir

Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi öğütülmüş pamuk ve susam saplarından üretilen peletlerin dayanıklılık direnci üzerine nem içeriğinin etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P < 0.05$). Nem içeriği arttıkça pamuk sapı peletlerinin dayanıklılık direnci azalmış ve en yüksek dayanıklılık direncini %98.70 ile P1 peletleri göstermiştir. Susam sapı peletlerinin dayanıklılık direnci incelendiğinde ise nemin etkisi S1 ve S2 peletleri için istatistiksel olarak önemsiz bulunmasına rağmen yine de en yüksek değer %97.50

ile S2 peletlerinde elde edilmiştir. Peletlerin nem içeriğinin artması S2 peletleri dışındaki diğer peletlerin dayanıklılık direncini düşürmüştür.

Miranda vd (2011) ve Miranda vd (2012) pelet nem içeriğinin artmasının pelet dayanıklılık direncini düşürdüğünü ve denemelerde kullanılan materyal çeşitlerine, karışım oranlarına ve pelet nem içeriğine bağlı olarak dayanıklılık direncinin %85.83-%97.08 arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Dayanıklılık direnci için elde edilen sonuçlar Miranda vd (2011) Serrano vd (2011), Miranda vd (2012), Celma vd (2012), Liu vd (2013), Ahn vd (2014), Kashaninejad vd (2014) ve Tumuluru (2014), tarafından elde edilen sonuçlarla paralellik göstermiş ve çoğunlukla literatür değerlerinin üzerinde bulunmuştur.

Peletlerin kırılma direnci değerleri incelendiğinde ise nem içeriğinin etkisi pamuk sapı peletleri için istatistiksel olarak önemli, susam sapı peletleri için ise önemsiz bulunmuştur. Ancak, pamuk saplarından elde edilen P1 ve P2 peletleri için ise nemin etkisinin istatistiksel olarak önemsiz olduğu görülmüştür. En yüksek kırılma direnci değerleri pamuk sapı için %99.94 ile P2 peletlerinde, susam sapı için ise %99.99 ile S1 ve S2 peletlerinde elde edilmiştir.

Tabil ve Sokhansanj (1996) ve Tabil ve Sokhansanj (1997) pelet dayanıklılık direncinin %80 ve üzeri olması durumunda pelet kalitesinin iyi olduğunu belirtmelerine rağmen, Avrupa Pelet Konseyi ENplus-A1 ve ENplus-A2 sınıfı pelet standartlarında odun peletlerinin dayanıklılık direncinin ≥ 97.5 , EN-B sınıfı pelet standartlarında ise ≥ 96.5 olması gerektiği belirtilmiştir. Avrupa Pelet Konseyi'nin açıklamış olduğu standartlar dikkate alındığında, pamuk ve susam saplarından elde edilen peletlerden P1 ve S2 peletlerinin dayanıklılık direncine göre ENplus-A1 ve ENplus-A2 sınıfı standartlara, P2 ve S1 peletlerinin ise EN-B sınıfı standartlara uygun olduğu belirlenmiştir. Yaklaşık %20 nem içeriğine sahip materyallerden elde edilen P3 ve S3 peletlerinin dayanıklılık direnci açısından Avrupa Birliği standartlarına uygun olmadığı görülmüştür.

Pamuk sapı peletlerinin dayanıklılık direnci test öncesi ve sonrası görünüşleri Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

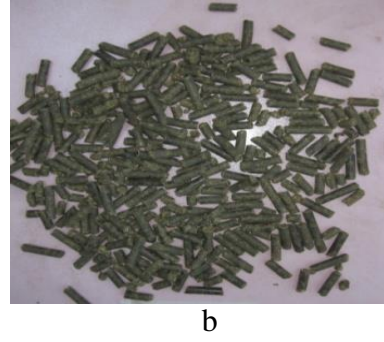


a



b

Şekil 4.1. P1 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünüşleri



Şekil 4.2. P2 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümü



Şekil 4.3. P3 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümü

Öğütülmüş pamuk saplarından farklı nem içeriklerinde elde edilen peletlerin dayanıklılık direnci test öncesi ve test sonrası görünümü incelendiğinde P1 ve P2 peletlerinde birkaç pelet dışında kırılma meydana gelmezken, P3 peletlerinde çok fazla kırılmalar meydana gelmiştir. P1 ve P2 peletlerinde meydana gelen kayıpları, peletlerin test cihazı içerisinde döndürülerek düşürülmesi sonucu, pelet uçlarından olan ufalanmalar oluştururken, P3 peletinde ise hem ufalanmalar hem de kırılmalar sonucu oluşan ve 3.15 mm elek altında kalan parçalar oluşturmuştur. Dayanıklılık direnci testi sonunda P1 ve P2 peletlerinin P3 peletlerine göre oldukça sağlam oldukları görülmüştür.

Susam saplarından elde edilen peletlerin dayanıklılık direnci test öncesi ve sonrası genel görünümü Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.4. S1 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümü



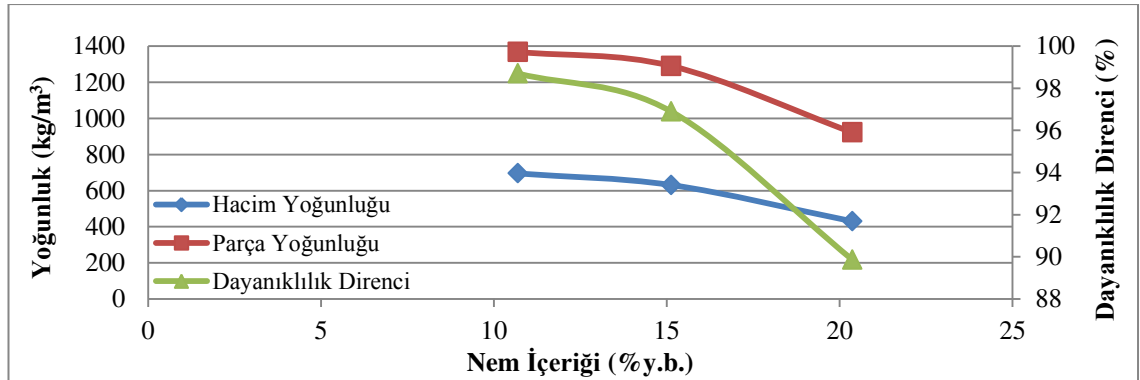
Şekil 4.5. S2 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünüşleri



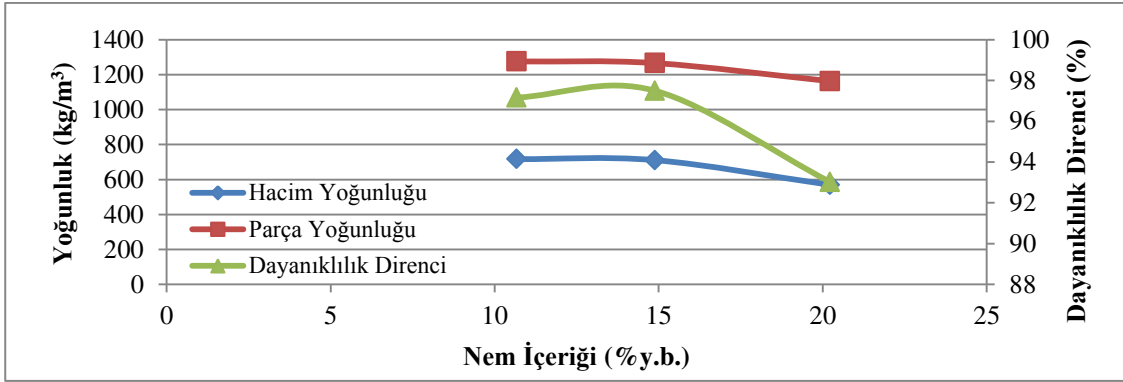
Şekil 4.6. S3 peleti dayanıklılık direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünüşleri

Susam sapı peletlerinin dayanıklılık direnci görünüşleri incelendiğinde S1, S2 ve S3 peletlerinde kırılma ve ufalanmaların meydana geldiği, ancak bunun S3 peletlerinde daha fazla olduğu görülmüştür. Test sonrası peletler 3.15 mm çaplı yuvarlak delikli elek kullanılarak elenmiş, elek altına geçen küçük parçalar kayıp olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak susam saplarından elde edilen peletlerden en düşük dayanımı S3 peletleri göstermiş, S1 ve S2 peletlerinin dayanımları birbirine yakın elde edilmiştir.

Pamuk ve susam saplarından elde edilen peletlerin yoğunluk ve dayanıklılık direnci üzerine materyal nem içeriğinin etkisi Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



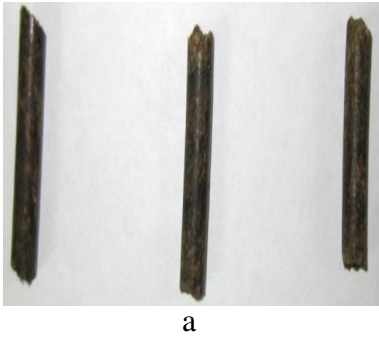
Şekil 4.7. Pamuk sapı materyal nem içeriğinin pelet yoğunluğu ve dayanıklılık direnci üzerindeki etkisi



Şekil 4.8. Susam sapı materyal nem içeriğinin pelet yoğunluğu ve dayanıklılık direnci üzerin etkisi

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 incelendiğinde materyal nem içeriğinin artması peletlerin hem hacim ve parça yoğunluğunu hem de dayanıklılık direncini olumsuz yönde etkilemiş, bu olumsuz durum özellikle pamuk sapı peletlerinde daha belirgin olmuştur. Özellikle %20 nem içeriğine sahip pamuk sapı materyallerden elde edilen peletlerin hem yoğunluk hem de dayanıklılık direnci açısından oldukça zayıf oldukları görülmüştür.

Pamuk sapı peletlerinin kırılma direnci test öncesi ve test sonrası görünümleri Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



a



b

Şekil 4.9. P1 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görünümleri

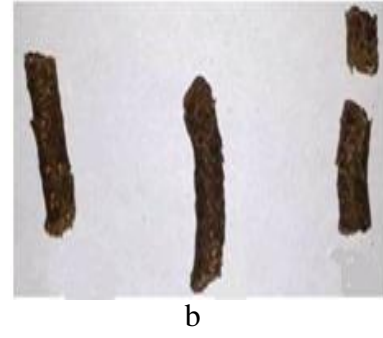
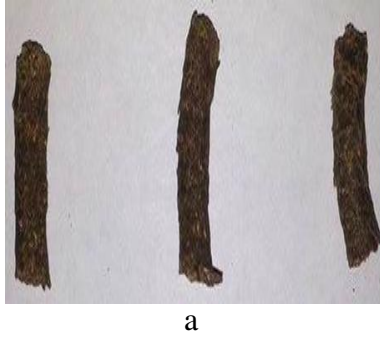


a



b

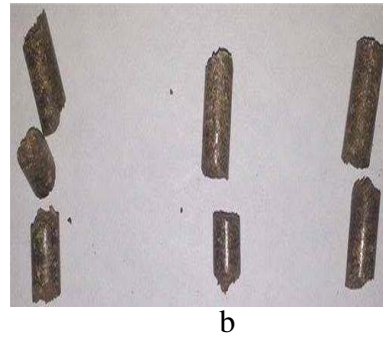
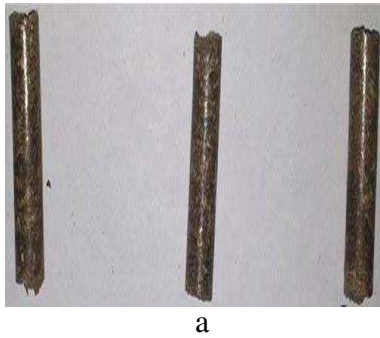
Şekil 4.10. P2 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görünümleri



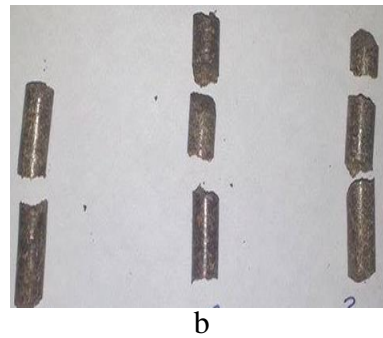
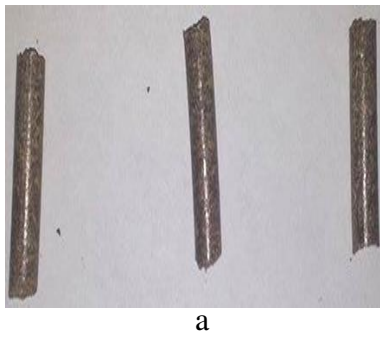
Şekil 4.11. P3 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görünümüleri

Pamuk sapı peletlerinin kırılma testi öncesi ve sonrası görünümüleri incelendiğinde peletlerde kırılmalar meydana gelmiştir. En fazla kırılmanın daha düşük pelet nem içeriğine, daha yüksek yoğunluğa ve yüzey sertliğine sahip P1 peletlerinde olduğu tespit edilmiştir. Pelet nem içeriğinin artması peletlerin sert bir yüzeye çarpmaları sonucu oluşan kırılmaları az da önlemiştir. Test sonunda kırılan parçalar 3.15 mm yuvarlak delikli elek üzerinde kaldığı için kayıp olarak değerlendirilmediğinden kırılma direnci değerleri oldukça yüksek elde edilmiştir.

Susam sapı peletlerinin kırılma direnci test öncesi ve test sonrası görünümüleri Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.12. S1 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görünümüleri



Şekil 4.13. S2 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görünümüleri



Şekil 4.14. S3 peleti kırılma direnci test öncesi (a) ve test sonrası (b) görünümüleri

Susam saplarından elde edilen peletlerin kırılma direnci test öncesi ve sonrası görünümüleri incelendiğinde tüm pelet örneklerinin kırılarak 2 ya da 3 parçaya ayrıldığı görülmüş, ancak kırılan parçalar 3.15 mm yuvarlak delikli elek üzerinde kaldığından kayıp olarak değerlendirilmemiştir. Susam sapı peletlerinde kırılma direnci sonrası neredeyse kayıp meydana gelmediği, özellikle S1 ve S2 peletlerin kırılma direnci değerlerinin 1 değerine çok çok yakın olduğu görülmüştür. Susam sapı peletlerinin 7. gün sonu nem içeriklerinin pamuk sapı peletlerine göre daha düşük, ayrıca materyal geometrik ortalama çapının öğütülmüş susam saplarında daha fazla olması susam sapı peletlerinin kırılma direnci artırıcıdır.

4.2.4. Peletlerin sıkıştırma direnci, özgül sıkıştırma direnci ve gerilme direnci

Sıkıştırma direnci testi, peletlerin ambalaj paketleri veya silolarda depolanması, taşıma ve nakliye süresince üstteki peletlerin alttaki peletlere uygulamış olduğu yüklerin simülasyonu için yapılmaktadır (Kaliyan ve Morey 2009, Kers vd 2010).

Pamuk ve susam sapı peletlerinin sıkıştırma direnci, özgül sıkıştırma direnci ve gerilme direnci değerleri ve varyans analizi sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Peletlerin sıkıştırma direnci, özgül sıkıştırma direnci ve gerilme direnci değerleri ve varyans analizi sonuçları

Pelet	Sıkıştırma direnci (N)	Özgül sıkıştırma direnci (N/mm)	Gerilme direnci (MPa)
P1	3532a ^z	92.85a	7.29a
P2	3176a	86.60a	6.78a
P3	1450b	40.98b	2.82b
Önemlilik	*	*	*
S1	2487a	67.96a	5.20a
S2	2668a	76.98a	5.85a
S3	1807b	56.42a	4.26a
Önemlilik	*		

*Aynı sütundaki değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak %5 alfa düzeyinde önemlidir.

^z: Aynı harfi taşıyan değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak önemsizdir

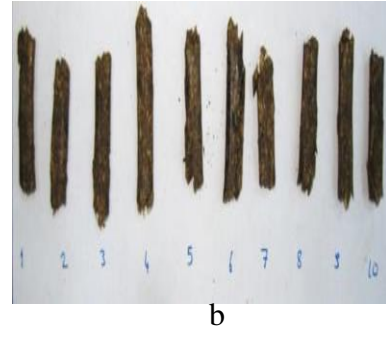
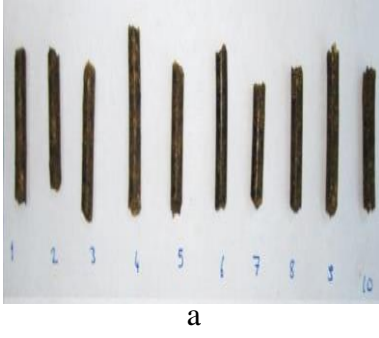
Çizelge 4.5 incelendiğinde materyal nem içeriğinin sıkıştırma direnci üzerine etkisinin hem pamuk hem de susam sapı peletleri için istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P<0.05$). Ancak, nemin sıkıştırma dirençleri üzerine etkisi P1, P2, S1 ve S2 peletleri için önemsizdir. Özgül sıkıştırma direnci ve gerilme direnci açısından ise pamuk sapı peletleri için önemli, susam sapı peletleri için ise önemsiz bulunmuştur. Materyal nem içeriğinin artması, S2 peletleri dışında, uygulanan yüklere karşı peletlerin göstermiş olduğu dirençleri düşürmüştür. Özellikle bu düşüş yaklaşık %20 nem içeriğine sahip materyallerden elde edilen peletlerde daha belirgin olmuştur. Peletlerin uygulanan yüklere karşı göstermiş olduğu dirençler açısından elde edilen sonuçlar peletlerin dayanıklılık direnci için elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermiş ve sıkıştırma, özgül sıkıştırma ve gerilme direnci değerleri açısından en yüksek dayanım pamuk sapı peletleri için P1 peletlerinde, susam sapı peletleri için ise S2 peletlerinde elde edilmiştir.

Sertlik değeri en yüksek olan pelet yüksek kaliteli olarak değerlendirilmektedir (Celma vd 2012). Zamarona vd (2011), materyal nem içeriğinin artmasının pelet yoğunluğunu düşürdüğünü ve buna bağlı olarak peletlerin dirençlerinin azaldığını belirtmiştir. Elde edilen sonuçlar Zamarona vd (2011) tarafından elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermiştir. Celma vd (2012) domates fabrikası atıklarından elde ettikleri peletler için en yüksek sıkıştırma direnci değerini %9.09 pelet nem içeriğinde 88 N olarak belirlemiştir. Bergström vd (2008) farklı biyokütle peletleri için özgül sıkıştırma direnci değerlerinin 40.1-61.2 N/mm arasında değiştiğini belirlemiştir. Gilbert vd (2009) tarafından farklı biyokütle materyallerinden elde ettikleri peletler için gerilme direnci değerleri 0.13-0.48 MPa, Liu vd (2014) tarafından farklı biyokütle ve karşım örneklerinden elde ettikleri peletler için ise 0.96-7.50 MPa arasında değişmiştir. Pamuk ve susam saplarından elde edilen peletlerin uygulanan yüklere karşı göstermiş olduğu dirençlerin literatür verilerinin bir kısmı ile paralellik gösterirken, çoğunun üzerinde olduğu görülmüştür, bu da özellikle %10 ve %15 nem içeriğine sahip materyallerle yapılan peletleme işleminin oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.

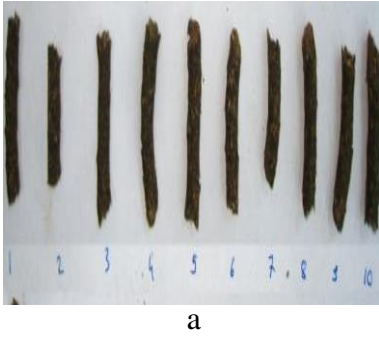
Pamuk ve susam sapı peletlerinin sıkıştırma direnci test öncesi ve sonrası görünümleri Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



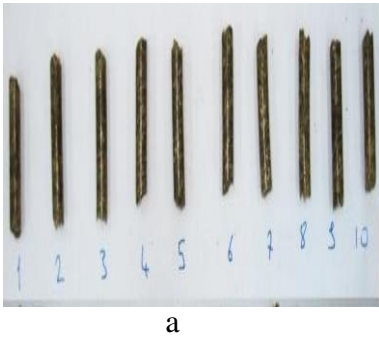
Şekil 4.15. P1 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümleri



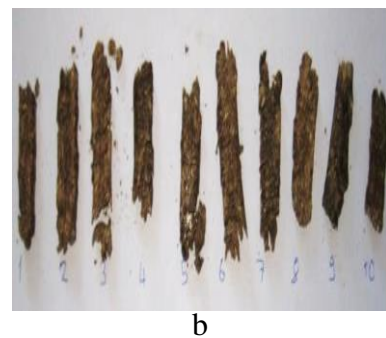
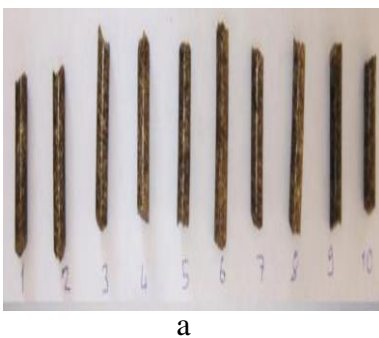
Şekil 4.16. P2 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümleri



Şekil 4.17. P3 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümleri



Şekil 4.18. S1 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümleri



Şekil 4.19. S2 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümleri



Şekil 4.20. S3 peleti sıkıştırma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri

Şekillerden de görüldüğü gibi test sonrası pamuk sapı peletlerinin orta noklarından uzunlamasına ezildikleri, susam sapı peletlerinin ise bazılarında ezilme ile birlikte belirli noktalardan kırıldıkları görülmüştür.

4.2.5. Peletlerin nem alma direnci

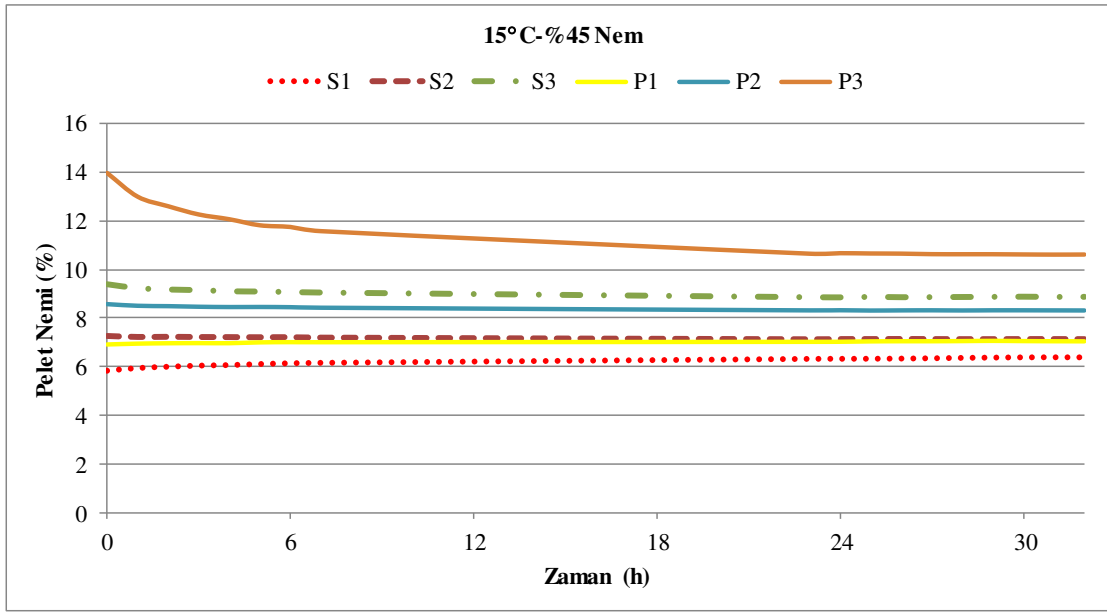
Birinci yöntemde; peletlerin nem alma-verme davranışlarının belirlenmesi için peletler 3 farklı sıcaklık ve bağıl nem şartlarında iklimlendirme kabini içinde bekletilmiştir. Peletlerin nem alma direnci test öncesi ve sonrası nem içerikleri sıcaklık ve nem değerlerine bağlı olarak Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Peletlerin nem alma direnç testi öncesi ve sonrası nem değerleri

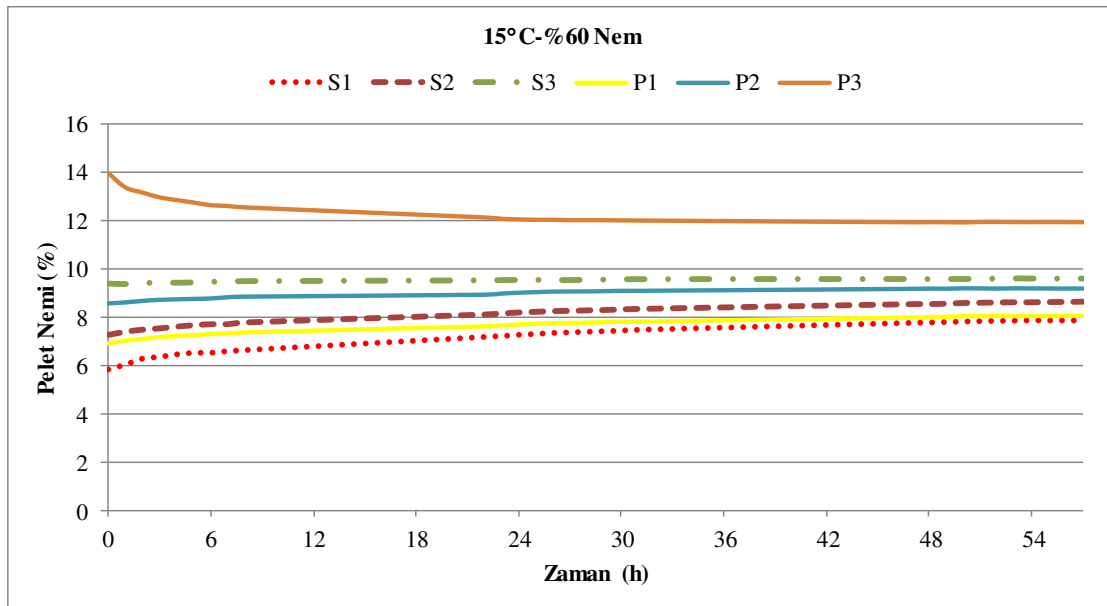
Pelet	Test öncesi pelet nem değerleri (%)			Test sonrası pelet nem değerleri (%)								
	15°C	25°C	40°C	15°C			25°C			40°C		
	%45-60-80 nem	%45-60-80 nem	%45-60-80 nem	%45 nem	%60 nem	%80 nem	%45 nem	%60 nem	%80 nem	%45 nem	%60 nem	%80 nem
P1	6.91	7.35	7.34	7.04	8.06	13.07	7.43	8.85	13.99	7.21	8.66	13.10
P2	8.57	8.57	8.88	8.31	9.19	13.74	8.02	9.29	14.33	7.79	9.12	12.97
P3	13.97	13.84	14.29	10.61	11.94	15.99	8.90	11.10	15.77	8.38	10.17	13.70
S1	5.83	5.81	5.70	6.38	7.86	13.04	6.52	8.32	13.15	6.42	8.00	12.27
S2	7.26	7.26	7.27	7.13	8.64	12.75	7.22	8.57	13.41	7.06	8.20	12.16
S3	9.39	9.81	9.81	8.87	9.60	12.90	8.62	9.75	13.10	7.39	8.76	11.57

Çizelge 4.6 incelendiğinde, aynı sıcaklık değerleri için ortamın nem içeriği arttıkça peletlerin nem alma durumları artmıştır. Nem artış durumu özellikle %80 nemde daha belirgin olmuştur.

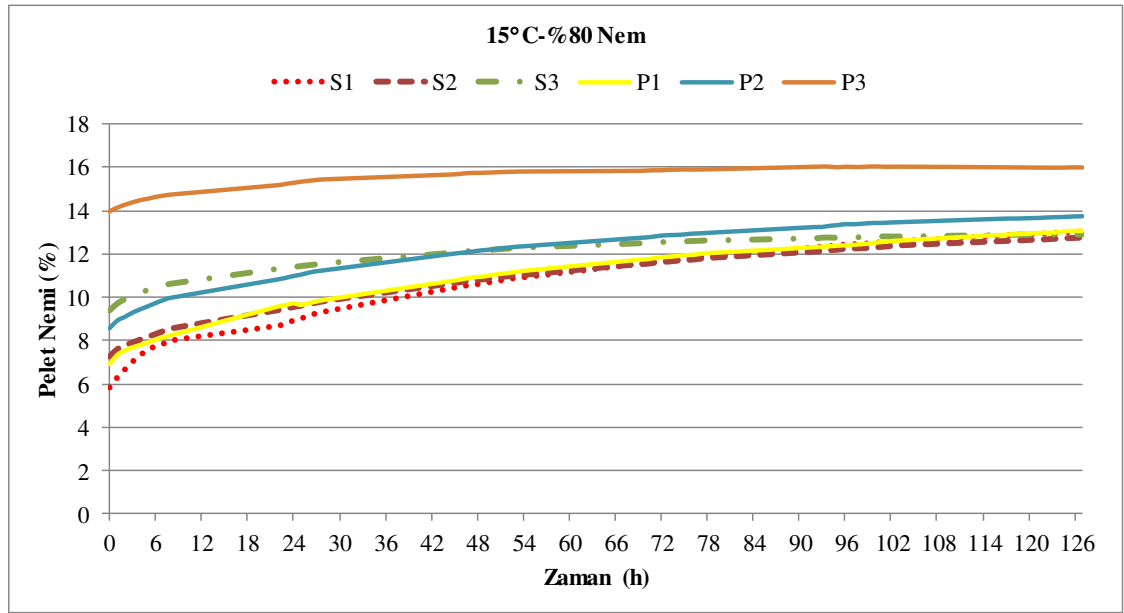
Pamuk ve susam sapı peletlerinin zamana bağlı olarak 15°C sıcaklık ve %45-60 ve 80 bağıl nem değerlerinde iklimlendirme kabini içerisinde bekletilmesi durumunda nem değişimleri Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’te verilmiştir.



Şekil 4.21. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 15°C sıcaklık ve %45 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi



Şekil 4.22. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 15°C sıcaklık ve %60 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi



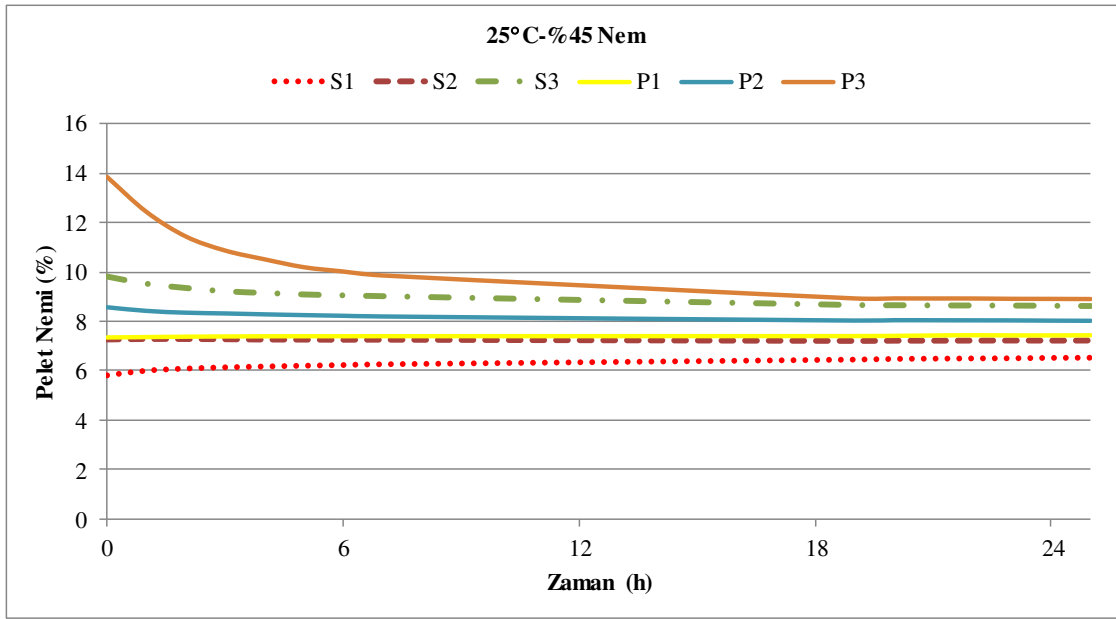
Şekil 4.23. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 15°C sıcaklık ve %80 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi 15°C sıcaklık ve %45 bağıl nem şartlarında P3 peletlerinin nem içeriği 24 saatlik süre boyunca azalma eğilimi göstermiş ve 24. saatten sonra hemen hemen stabil hale gelirken, P1, P2, S1, S2 ve S3 peletlerinin nem içerikleri test boyunca çok fazla değişmemiştir. Tüm peletler 32 saatlik bir süre sonunda ağırlık olarak neredeyse sabit konuma gelmişler ve buna bağlı olarak nem içeriklerinde değişiklik olmamıştır.

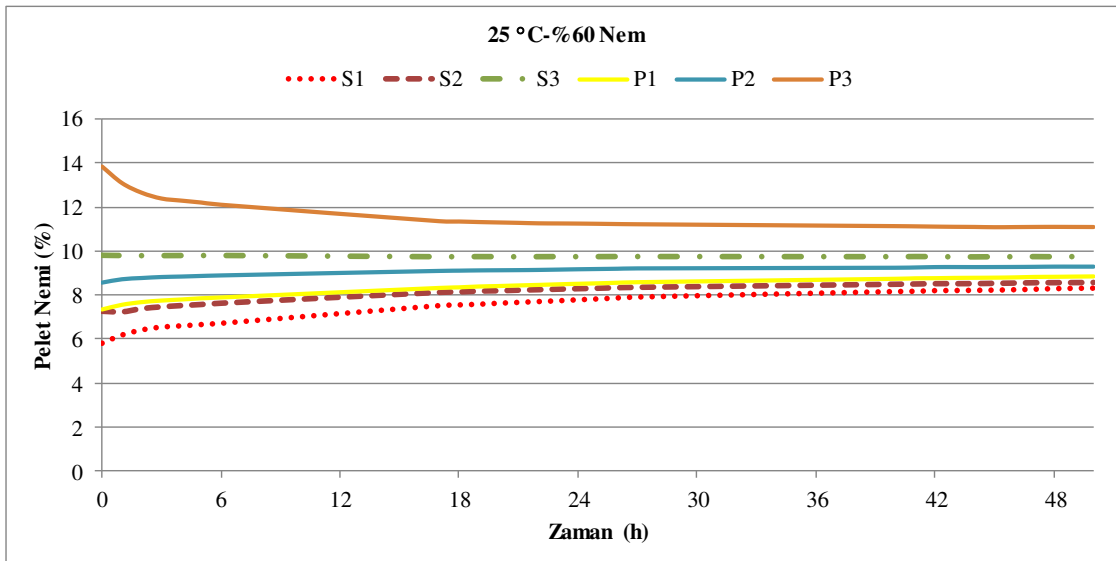
Şekil 4.22 incelendiğinde 15°C sıcaklık ve %60 bağıl nem şartlarında sadece P3 peleti nem kaybederken, diğer tüm peletler nem almış ve peletlerin denge nemine gelme süreleri yaklaşık olarak 57 saat olmuştur.

Şekil 4.23 incelendiğinde ise 15°C sıcaklık ve %80 bağıl nem şartlarında tüm peletler nemden etkilenmiştir. Peletlerin test sonunda nem içerikleri oldukça fazla oranda artmış ve peletlerin denge nemine gelme süreleri 127 saat gibi oldukça uzun sürmüştür. Bu testte hava neminden en fazla, nem içeriği en düşük olan S1 peleti, en az ise nem içeriği en fazla olan P3 peleti etkilenmiştir.

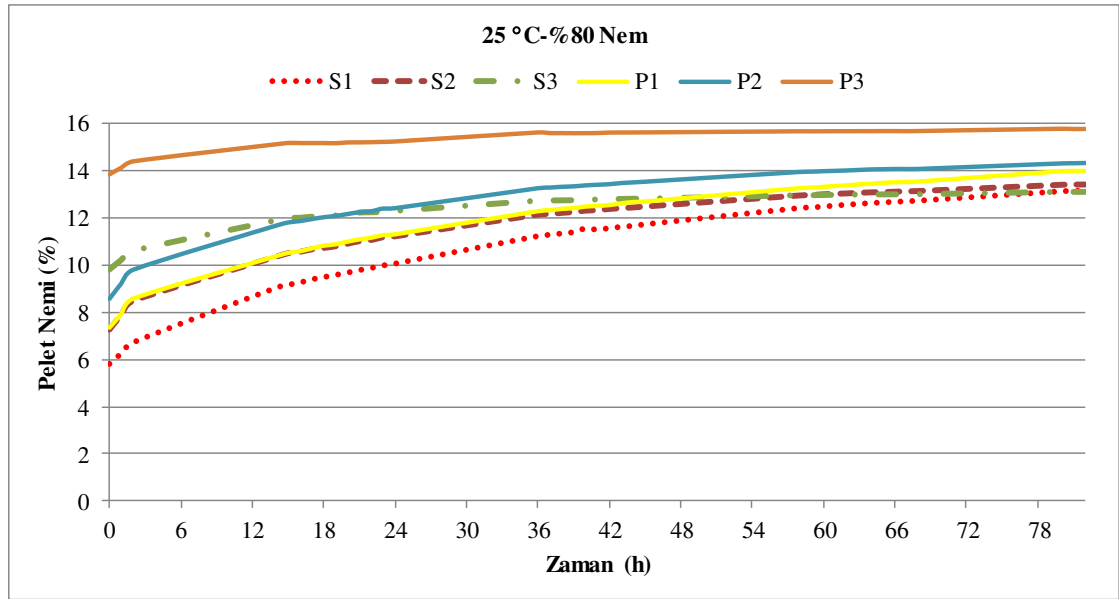
Pamuk ve susam sapı peletlerinin zamana bağlı olarak 25°C sıcaklık ve %45-60 ve 80 bağıl nem değerlerinde iklimlendirme kabini içerisinde bekletilmesi durumunda nem değişimleri Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.24. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 25°C sıcaklık ve %45 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi



Şekil 4.25. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 25°C sıcaklık ve %60 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi



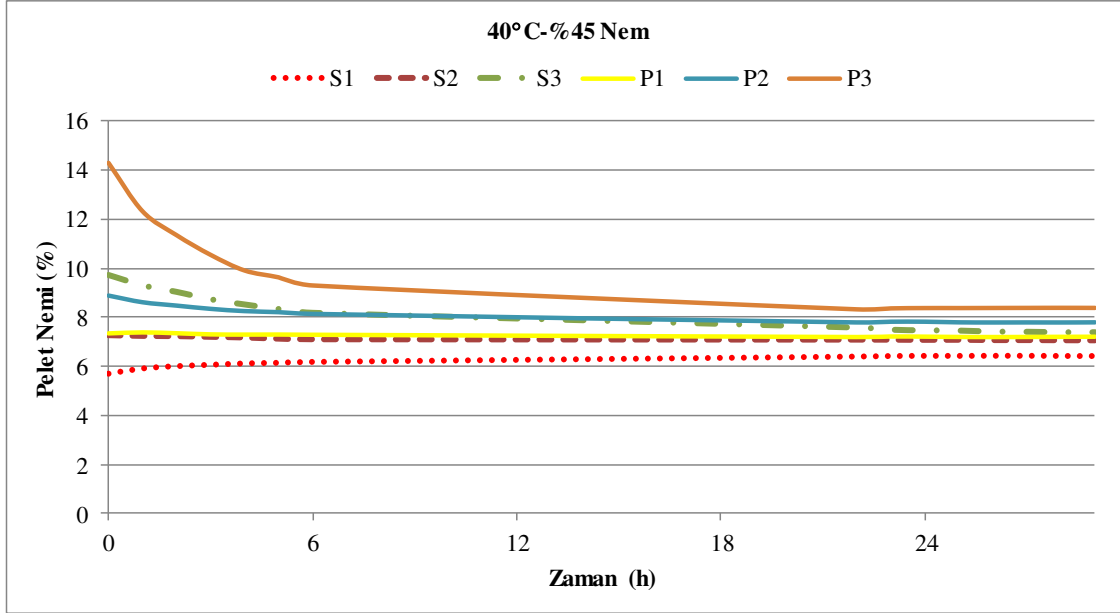
Şekil 4.26. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 25°C sıcaklık ve %80 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi

Şekil 4.22 incelendiğinde yüksek nem içeriğine sahip P3 peletlerinin nem içeriği beklendiği gibi başlangıçta hızlı bir şekilde düşerken, diğer peletlerin nem içeriğinde çok fazla bir değişim olmamış ve tüm peletler 25 saatlik bir süre sonunda sabit bir nem içeriğine ulaşmışlardır. P2, S2 ve S3 peletlerinin nem içeriği çok az düşerken, P1 ve S1 peletlerinin nem içeriği çok az artmıştır. P3 peleti dışındaki tüm peletler bu sıcaklık ve nem değerlerinde nem içeriklerini hemen hemen muhafaza etmişlerdir. Bu durum peletlerin bu koşullar altında uzun süre hava neminden etkilenmeden depolanabileceğini göstermiştir.

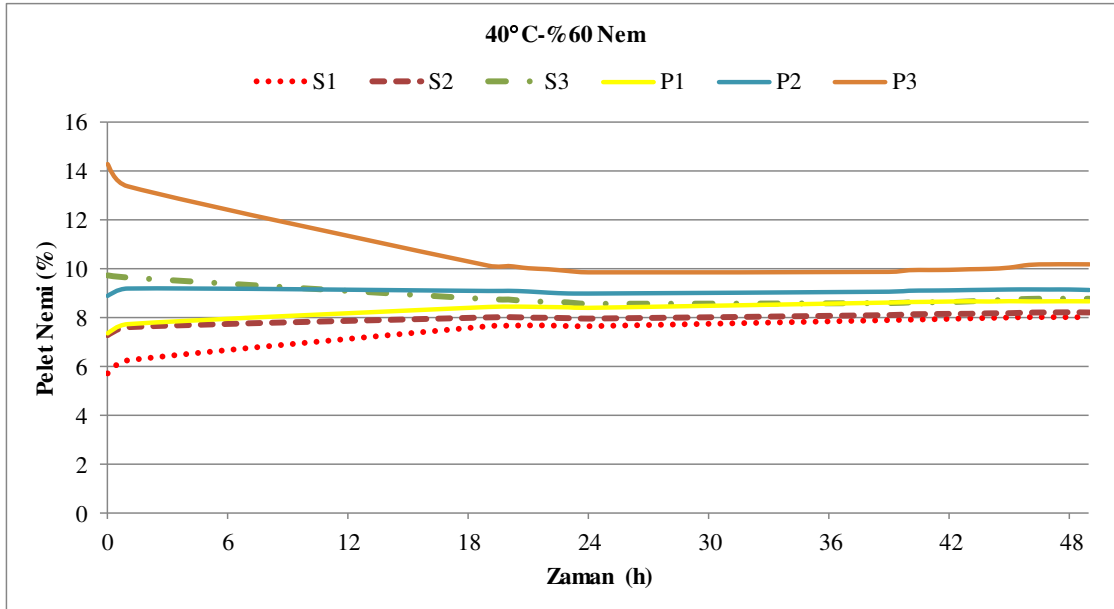
Pamuk ve susam sapı peletlerinin 25°C sıcaklık ve %60 bağıl nem şartlarındaki depolama koşullarındaki davranışları incelendiğinde; P1, P2, S1 ve S2 peletlerinin çok az nem aldıkları, P3 ve S3 peletlerinin ise nem kaybettikleri belirlenmiştir. Ancak, başlangıç nem içeriği daha yüksek olan P3 peletindeki nem kaybı S3 peletine göre daha fazla olmuştur. Tüm peletlerin ortam ile denge nemine gelme süreleri 25°C sıcaklık ve %45 bağıl nem koşullarına göre daha uzun sürmüştür. Test sonunda yine de P3 peleti dışındaki peletlerin nem içeriğinin %10'un altında olduğu görülmüştür.

Pamuk ve susam sapı peletlerinin 25°C sıcaklık ve %80 bağıl nem koşullarındaki nem alma durumları incelendiğinde kısa bir süre içerisinde tüm peletlerin hızlı bir şekilde nem aldıkları belirlenmiş ve denge nemine gelme süreleri uzun sürmüştür. Tüm peletlerin nem içerikleri test sonunda %13'ün üstüne çıkmıştır. Bu sonuç depolama koşullarının ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle nem içeriği %10'un altında olan peletler yüksek nemli koşullara maruz bırakılmamalıdır.

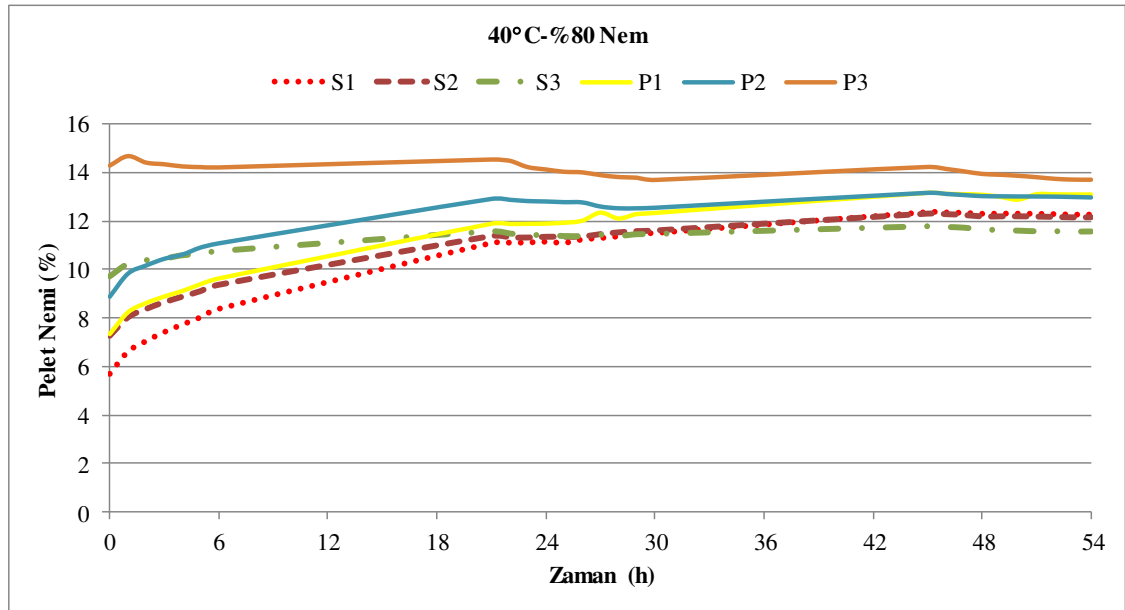
Pamuk ve susam sapı peletlerinin zamana bağlı olarak 40°C sıcaklık ve %45-60 ve 80 bağıl nem değerlerinde iklimlendirme kabini içerisinde bekletilmesi durumunda nem değişimleri Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.27. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 40°C sıcaklık ve %45 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi



Şekil 4.28. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 40°C sıcaklık ve %60 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi



Şekil 4.29. Pamuk ve susam sapı peletlerinin nem içeriklerinin 40°C sıcaklık ve %80 bağıl nem şartlarında zamana bağlı olarak değişimi

Şekil 4.27 incelendiğinde başlangıç nem içeriği en düşük olan S1 peleti dışındaki tüm peletler nem kaybetmiştir. Özellikle P3 peletlerinin başlangıç nem içeriği daha yüksek olduğundan çok kısa sürede hızlı bir şekilde nem kaybetmiş, daha sonraki zaman diliminde nem kaybı yavaşlamıştır. Test sonunda peletlerin nem içerikleri %7-8 civarında oluşmuş, bu durum %10 nem içeriğinin altındaki peletlerin ortam koşullarından çok fazla etkilenmeden daha sağlıklı bir şekilde depolanabileceğini göstermiştir.

Şekil 4.28 incelendiğinde 40°C ve %60 nem içeriğine sahip depolama koşullarında diğer peletlere göre başlangıç nem içeriği daha düşük olan P1, S1 ve S2 peletlerinin ortamdaki nem aldıkları, diğer peletlerin nem kaybettikleri görülmüştür. Peletlerin nem alma ve nem verme durumları yaklaşık 18 saatlik süre içerisinde gerçekleşmiş, bu süreden sonra değişim çok fazla olmamış ve yaklaşık 50 saatlik bir sürenin sonunda hemen hemen stabil hale gelmişlerdir. P3 peleti dışındaki diğer peletlerin nem içerikleri test sonunda %8-9 aralığında gerçekleşmiştir.

Şekil 4.29 incelendiğinde P3 dışındaki tüm peletlerin hızlı bir şekilde nem aldıkları, P3 peletlerinin nem içeriğinin çok fazla değişim göstermediği tespit edilmiştir. Tüm peletlerin test sonu nem içerikleri %11.5-13.70 aralığında gerçekleşmiş ve peletlerin denge nemine gelme süreleri 40°C ve %45-60 bağıl nem koşullarına göre daha uzun sürmüştür. Bu sonuç peletlerin başlangıç nem içeriğine bağlı olmakla birlikte yüksek sıcaklık ve nem koşullarına bırakılmaması gerektiğini göstermiştir.

Peletlerin nem alma durumlarının belirlenmesi için yapılan testler sonunda elde edilen sonuçlar Fasina (2008) tarafından elde edilen sonuçlarla paralellik göstermiştir.

İkinci yöntemde fırın kurusu peletler iklimlendirme kabiniinde 27°C sıcaklık ve %90 bağıl nem şartlarında 24 h bekletilmiştir. Test sonunda peletlerin nem alma durumları Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Peletlerin 27°C ve %90 bağıl nem şartlarında nem alma durumu

Pelet	Nem alma durumu (%)
P1	12.94a ^z
P2	13.51a
P3	21.65b
Önemlilik	*
S1	13.01a
S2	12.68a
S3	16.74b
Önemlilik	*

*Aynı sütundaki değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak %5 alfa düzeyinde önemlidir.

^z: Aynı harfi taşıyan değerler arasındaki farklılık istatistiksel olarak önemsizdir

Çizelge 4.7 incelendiğinde materyal nem içeriğinin nem alma direnci üzerine etkisi hem pamuk hem de susam sapı peletleri için istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P < 0.05$). Ancak, nem içeriğinin etkisi P1, P2, S1 ve S2 peletleri için önemsizdir. Test sonunda peletlerin nem alma durumu açısından en düşük nemi %12.68 ile S2, en yüksek nemi ise %21.65 ile P3 peletleri almıştır. Elde edilen sonuçlar peletlerin birinci yöntemle belirlenen nem alma durumları ve dayanıklılık direnci değerleri ile benzerlik göstermiştir.

Liu vd (2013) peletlerin dayanıklılık direnci arttıkça peletlerin iklimlendirme kabiniinde daha az nem aldıklarını belirlemişlerdir. Pamuk ve susam sapı için elde edilen sonuçlar Liu vd (2013) tarafından elde edilen sonuçlarla paralellik göstermiştir.

Pamuk sapı peletlerinin ikinci yöntemle belirlenen nem alma direnci test öncesi ve test sonrası görünüşleri Şekil 4.30, Şekil, 4.31 ve Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.30. P1 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünüşleri



Şekil 4.31. P2 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri



Şekil 4.32. P3 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri

Şekillerden de görüldüğü gibi fırın kurusu peletlerin 27°C ve %90 bağıl nem koşullarında 24 h bekletilmeleri sonucunda pelet yüzeylerinde az da olsa şekil değişiklikleri olmuş, ancak hiç birinde dağılma meydana gelmemiştir. Bu değişim P3 peletlerinde daha belirgin durumdadır. Hammadde nem içeriği arttıkça elde edilen peletlerin kalitesine peletlerin nem alımına karşı göstermiş olduğu direnç azalmıştır.

Susam sapı peletlerinin ikinci yöntemle belirlenen nem alma direnci test öncesi ve test sonrası görünümüleri Şekil 4.33, Şekil, 4.34 ve Şekil 4.35’de verilmiştir.



Şekil 4.33. S1 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünümüleri



Şekil 4.34. S2 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünüşleri



Şekil 4.35. S3 peleti nem alma direnci test öncesi (a) ve sonrası (b) görünüşleri

Şekillerden de görüldüğü gibi susam sapı peletlerinin test sonrasında nem alma durumuna bağlı olarak görünüşlerinde pamuk sapı peletlerinde olduğu gibi az da olsa yüzeylerinde değişiklikler olmuş, ancak dağılmamışlardır.

Peletlerin nem alma dirençleri genel olarak incelendiğinde depolama koşullarındaki nem ve sıcaklık değerleri ile pelet nem içeriğine bağlı olarak yüksek nemli peletler düşük nemli ortamlarda nem kaybederken, yüksek nemli ortamlarda az da nem almıştır. Ancak, düşük nem içeriğine sahip peletlerin ortam nemi arttıkça nem alma durumlarının arttığı belirlenmiştir. Yine de pamuk ve susam saplarından elde edilen peletlerin P3 dışında neme karşı dayanımların oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Yine de uzun depolama sürelerinde peletler yüksek neme maruz bırakılmamalı ve suyla temas ettirilmemelidir. Nemin ve suyun oluşturacağı olumsuz özelliklerin önüne geçmek için peletlerin iyi bir şekilde ambalajlanması gerekmektedir.

5. SONUÇ

Türkiye’de oldukça geniş alanlarda üretimi yapılan ve ekonomik değeri oldukça fazla olan pamuk ve susam bitki saplarının peletlenerek katı yakacak formunda değerlendirilmesi amacıyla yürütülen bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- Yapılan ön denemelerde kurutulup-öğütülmüş pamuk ve susam sapları farklı nem içeriklerinde mevcut pelet makinesinde yüksek kalitede peletlenememiştir.
- Yapıştırıcı madde olarak %7.5 oranında sıvı melas kullanılarak yapılan peletleme çalışmalarında %10 ve %15 materyal nem içeriklerinde her iki materyalden de yüksek kaliteli pelet üretilmiştir.
- Pamuk ve susam saplarının peletlenmesinde mevcut peletleme makinesi için en uygun nem içeriği %10-15 arasında olmalıdır.
- Pamuk ve susam saplarından elde edilen peletlerin hacim ve parça yoğunlukları oldukça yüksek bulunmuştur.
- Materyal nem içeriğinin artması pelet yoğunluklarını olumsuz olarak etkilemiştir.
- Fiziksel testler sonunda peletlerin oldukça yüksek kaliteli olduğu görülmüş ve materyal nem içeriğinin yüksek olması pelet kalitesini olumsuz etkilemiştir.
- Peletler depolama süresince çevre şartlarından çok az etkilenmiştir.
- Depolama ortamının nem içeriğinin artması peletlerin nem alma hızını artırmıştır.
- Düşük nem koşullarında peletler oldukça yüksek kalitede depolanabilecektir.
- Peletlerin iyi bir şekilde ambalajlanması ile yakılmasına kadar geçen sürede herhangi bir olumsuz durumla karşılaşmadan oldukça yüksek kalitede taşıma, nakliye ve depolama işlemleri gerçekleştirilebilecektir.
- Peletler evsel ve sera ısıtmasında, merkezi ısı ve güç santrallerinde doğrudan ya da kömür ile birlikte katı yakıt olarak kullanılabilir.
- Pamuk ve susam saplarının herhangi bir yapıştırıcı madde kullanmadan doğrudan peletlenmesine yönelik çalışmalar farklı kalıp özelliklerinde tekrarlanmalı ve en uygun peletleme parametreleri belirlenmelidir.
- Peletleme işleminde otomatik materyal besleme sistemi kullanılarak elle beslemenin neden olduğu olumsuz özellikler ortadan kaldırılmalıdır.
- Peletleme işlemi öncesi materyale ön ısıtma ve sıcak buhar uygulamalarının pelet kalitesi, makine kapasitesi ve enerji tüketimi üzerine etkileri belirlenmelidir.
- Peletlerin depolama koşullarından nasıl etkilendiğinin belirlenmesi amacı ile belirli aralıklarla pelet kalitesi ile ilgili testler tekrarlanarak depolama koşullarının pelet kalitesine etkisi belirlenmelidir.
- Peletlerin pelet sobalarında yakılmaları sonucu atmosfere salınan emisyon değerleri belirlenmeli, en uygun yakma koşulları tespit edilmelidir.
- Bu tür tarımsal artıkların oldukça fazla çıktığı bölgelere peletleme tesisleri ivedilikle kurulmalı ve bu tür biyokütle enerji kaynakları ekonomiye kazandırılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- ACAROĞLU, M. 1998 Türkiye’de biyokütle enerjisinin mevcut durumu, araştırma ve geliştirme çalışmaları, politikaları ve alınması gereken önlemler. Özel Rapor. Türkiye I. Enerji Şurası, 7-9 Aralık, İstanbul.
- ACAROĞLU, M., ve ÜLTANIR, M.Ö. 2000. Türkiye’de biyokütle (Biomass) enerji potansiyeli ve değerlendirilmesi için öneriler. Türkiye 8. Enerji Kongresi, WEC-TNC, 8-11 Mayıs, ODTÜ, Ankara.
- ADAPA, P. K., SINGH, A. K., SCHOENAU, G. J. and TABIL, L. G. 2006. Pelleting characteristics of fractionated alfalfa grinds: hardness models. *Power Handling and Processing*, 18 (5): 1-6
- ADAPA, P., TABIL, L., and SCHOENAU, G. 2009. Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw. *Biosystems Engineering*, 104: 335-344.
- AHN, B.J., CHANG, H., LEE, S.M., CHOI, D.H., CHO, S.T., HAN, G., and YANG, I. 2014. Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. Sawdust. *Renewable Energy*, 62: 18-23.
- ASAE. 2003. S319.3, Method of Determining and Expressing Fineness of Feed Materials by Sieving, American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE).
- ATEŞ, F., PÜTÜN, E., ve PÜTÜN, A.E. 2004. Fast pyrolysis of sesame stalk: yields and structural analysis of bio-oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71: 779-790.
- BALASUBRAMANIAN, D. 2000. Physical properties of raw cashew nut. *Journal of Agricultural Engineering Reserach*, 78: 291-297.
- BALLESTEROS, I., NEGRO, M.J., OLIVA, J.M., CABANAS, A., MANZANARES, P., and BALLESTEROS, M. 2006. Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 130:496-508.
- BAŞÇETİNÇELİK, A., KARACA, C., ÖZTÜRK, H.H., KAÇIRA, M., and EKİNCİ, K. 2005. Agricultural biomass potential in Turkey. 9th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture and 27th International Conference of CIRG Section IV, pp. 195-199, 27-29 September, İzmir, Turkey.
- BAYRAK, M ve ESEN, Ö. 2014. Türkiye’nin enerji açığı sorunu ve çözümüne yönelik arayışlar. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 28 (3): 139-158.
- BERGSTRÖM, D., ISRAELSONN, S., ÖHMAN, M., DAHLQVİST, S., 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: 1324-1329.
- BHATTACHARYA, S.C. and SALAM, P.A. 2002. Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries. *Biomass and Bioenergy*, 22: 305-317.
- BİLGİN, S. 2008. Sera Bitkisel Biyokütle Atıklarının Briketlenmesi, Briket Özelliklerinin ve Yanma Sonu Gaz Emisyonlarının Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 126 s.
- BOZTEPE, E. ve KARACA, A. 2009. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak tarımsal atıklar. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Türkiye 11. Enerji Kongresi, İzmir.
- BMU. 2009. National Biomass Action Plan for Germany: Biomass and Sustainable Energy Supply. <http://www.bmel.de>, [Son erişim tarihi: 02 Nisan 2013]
- CELMA, A.R., CUADROS, F., RODRIGUEZ, F.L. 2012. Characterization of pellets from industrial tomato residues. *Food and Bioproducts Processing*, 90: 700-706.
- CHEN, L., XING, L., and HAN, L. 2009. Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 2689-2695.
- COLLEY, Z.J. 2006. Compaction of switchgrass for value added utilization. M. Sc. Thesis, The Graduate Faculty of Auburn University, 132 p.
- COŞKUN, M.B., YALÇIN, I. ve ÖZARSLAN, C. 2005. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt). *Journal of Food Engineering*, 74(4): 523-528.
- CUBERO-ABRACA, R., MOYA, R., VALARET, J., and FILHO, M. T. 2014. Use of coffee (*coffea arabica*) pulp for the production of briquettes and pellets for heat generation. *Ciênc. Agrotec.* 38(5): 461-470.
- DEK-TMK. 2000. 1999 yılı Türkiye enerji raporu. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Ankara.
- DEK-TMK. 2013. 2013 yılı Türkiye Enerji Raporu. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 283 s.
- EC. 2005. Biomass Green Energy for Europe. European Communities. Luxembourg.
- EC. 2010 Report from the Commission to the Council and the European Parliament on Sustainability Requirements for the Use of Solid and Gaseous Biomass Sources

- in Electricity, Heating and Cooling. European Commission. COM (2010) 11 final, Brussels.
- ECC. 2007 Communication from the Commission to the Council and the European Parliament: Renewable Energy Road Map Renewable Energies in the 21st Century: Building a More Sustainable Future. Commission of the European Communities. COM (2006) 848 final, Brussels.
- EN 14774-2. 2009.Solid Biofuels. Determination of Moisture Content. Oven Dry Method. Total Moisture. Simplified method.
- EN 14961-2. 2013. European Pellet Council. Handbook for the Certification of Wood Pellets for Heating Purposes, Version 2.0.
- 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
- ERİŞ, A. 2003. Enerji Politikaları ile Yerli, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları, TMMOB Türkiye VI. Enerji Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 164 s.
- ETKB. 2014. Enerji İstatistikleri. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <http://www.enerji.gov.tr>, [Son erişim tarihi: 25 Kasım 2014]
- FASINA, O.O. 2008. Physical properties of peanut hull pellets. *Bioresource Technology*, 99: 1259-1266.
- GARCIA-MARAVAR, A., POPOV, V. and ZAMORANO, M. 2011. A review of European standards for pellet quality. *Renewable Energy*, 36: 3537-3540.
- GIL, M.V., OULEGO, P., CASAL, M.D., PEVİDA, C., PIS, J.J., and RUBIERA, F. 2010. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource Technology*, 101: 8859-8867.
- GILBERT, P., RYU, C., SHARIFI, V., and SWITHENBANK, J. 2009. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. *Fuel*, 88: 1491-1497.
- GİZLENCİ, Ş., ACAR, M., ve ŞAHİN, M. 2012. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının (Biyodizel, Biyoetanol ve Biyokütle) projeksiyonu. *Tarım makinaları Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science)*, 8(3): 337-344.
- GOSWAM, D.Y., and KREITH, F. 2007. Global energy system. In: Kreith F, Goswami D, editors. Handbook of energy efficiency and renewable energy. Taylor and Francis Group, LLC, pp. 1-20, Florida.

- GROVER, P.D., and MISHRA, S.K. 1996 Biomass briquetting: Technology and practices. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok, 43 p.
- GÜRBÜZ, Y., YAZGAN, O., ve KAMALAK, A. 2003. Karma yemlerdeki farklı pelet bağlayıcıların pelet kalitelerine etkileri. *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(1): 160-167.
- HOLM, J.K., HENRIKSEN, U.B., HUSTAD, J.E., and SORENSEN, L.H. 2006. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellet production. *Energy and Fuel*, 20: 2686-2694.
- HOOVER, A. N., TUMULURU, J. S., TEYMOURI, F., MOORE, J., and GRESHAM, G. 2014. Effect of pelleting process variables on physical properties and sugar yields of ammonia fiber expansion pretreated corn stover. *Bioscience Technology*, 164: 128-135.
- IEA. 1998. World Energy Outlook. International Energy Agency, Paris.
- IEA. 2003. Energy Balances of non-OECD and OECD Countries, 2000-2001. International Energy Agency, Paris.
- IEA. 2003c. Statistics, Renewable Information. International Energy Agency.
- IEA. 2008. World Energy Outlook. International Energy Agency, Paris.
- IEA. 2009. World Energy Outlook. International Energy Agency, Paris.
- IEA. 2010. World Energy Outlook, Executive Summary. International Energy Agency, Paris.
- IEA. 2014. Key World Energy Statistics. International Energy Agency, Paris.
- KALIYAN, N., and MOREY, R.V. 2009. Factor affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33: 337-359.
- KASHANINEJAD, M., and TABIL, L.G. 2011. Effect of microwave-chemical pretreatment on compression characteristics of biomass grinds. *Biosystem Engineering*, 108 (1): 36-45.
- KASHANINEJAD, M., TABIL, L.G., and 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.
- KAYGUSUZ, K. and TÜRKER, M.F. 2002. Biomass energy potential in Turkey. *Renewable Energy*, 26: 661-678.

- KÜRKLÜ, A. ve BİLGİN, S. 2007. Pamuk ve susam saplarının briketlenmesi üzerine bir araştırma. *Tarım Makinaları Bilim Dergisi*, 3 (3): 151-159.
- LAM, P.S., SOKHANSANJ, S., BI, X., LIM, C.J., and MELIN, S. 2011. Energy input and quality of pellets made from steam-exploded douglas fir (*Pseudotsug menziesii*). *Energy Fuels*, 25: 1521-1528.
- LARSSON, S.H., and RUDOLFSSON, M. 2012. Temperature control in energy grass pellet production – effects on process stability and pellet quality. *Applied Energy*, 97: 24-29.
- LEHTIKANGAS, P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, 20: 351-360.
- LIU, Z., JIANG, Z., CAI, Z., FEI, B., YU, Y., and LIU, X. 2013. Effects of carbonization conditions on properties of bamboo pellets. *Renewable Energy*, 51: 1-6.
- LIU, X., LIU, Z., FEI, B., CAI, Z., JIANG, Z., and LIU, X. 2013. Comparative properties bamboo, rice straw pellets. *Bio Resource*, 8(1): 638-647.
- LIU, Z., LIU, X., FEI, B., JIANG, Z., CAI, Z., and YU, Y. 2013. The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. *Renewable Energy*, 52: 1-5.
- LIU, X., FEI, B., JIANG, Z., CAI, Z., and LIU, Z. 2014. Important properties of bamboo pellets to be used as commercial solid fuel in China. *Wood Sci Technol*, 48: 903-917.
- LIU, Z., QUEK, A., and BALASUBRAMANIAN, R. 2014. Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. *Applied Energy*, 113: 1315-1322.
- LU, D., TABIL, L.G., WANG, D., WANG, G., and EMAMI, S. 2014. Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders. *Biomass and Bioenergy*, 69: 287-296.
- MANI, S., TABIL, L.G., and SOKHANSANJ, S. 2003. An overview of compaction of biomass grinds. *Powder Handling and Process*, 15: 160-168.
- MANI, S., TABIL, L.G., and SOKHANSANJ, S. 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 27: 339-352.
- MANI, S., TABIL, L.G., and SOKHANSANJ, S. 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical of biomass pellets from Grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30: 648-654.

- MRANDA, M.T., ARRANZ, J.I., ROMÁN, S., ROJAS, S., MONTERO, I., LÓPEZ, M., and CRUZ, J.A. 2011. Characterization of grape pomace and pyrenean oak pellets. *Fuel Processing Technology*, 92: 278-283.
- MRANDA, M.T., ARRANZ, J.I., MONTERO, I., ROMÁN, S., ROJAS, C.V., and NOGALES, S. 2012. Characterization and combustion of olive pomace and forest residue pellets. *Fuel Processing Technology*, 103: 91-96.
- MONTERO, I., MIRANDA, T., SEPULVEDA, F. J., ARRANZ, J. I., and NOGALES, S. 2014. Analysis of pelletizing of granulometric separation powder from cork industries. *Materials*, 7: 6686-6700.
- NILSSON, D., BERNESSON, S., and HANSSON, P.A. 2011. Pellet production from agricultural raw materials – A systems study. *Biomass and Bioenergy*, 35: 679-689.
- ÖZTÜRK, H.H. 2012. Enerji Bitkileri ve Biyoyakıt Üretimi, *Hasad Yayıncılık Ltd. Şti.*, İstanbul, 272 s.
- PAPUR, D. ve SOHTAOĞLU, N. H. 2012. Avrupa birliği enerji mevzuatında yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesine yönelik girişimler, Türkiye 12. Enerji Kongresi 14-16 Kasım 2012 ODTÜ, Ankara.
- PIETSCH, W. 2002. Agglomeration Processes: Phenomena, Technologies, Equipment. Weinheim: Wiley-VCH, 614 p.
- RAZUAN, R., FINNEY, K.N., CHEN, Q., SHARIFI, V.N., and SWITHENBANK, J., Pelletised fuel production from palm kernel cake. *Fuel Processing Technology*, 92 (3): 609-615.
- REHKUGAR, G. E., and BUCHELE, W. F. 1969. Bio-mechanics of forage wafering. *Transactions of the ASAE*, 12: 1-8.
- RICHARDS, S. R. 1990. Physical testing of fuel briquettes. *Fuel Process Tech.* 25: 89-100.
- SANTAMARTA, L.C., CHANEY, K., GODWIN, R.J., and WHITE, D.R. 2012. Physical quality changes during the storage of canola (Brassica Napus L.) straw pellets. *Applied Energy*, 95: 220-226.
- SARKAR, R., and PAL, P.K. 2005. Effect of crop geometry, fertility level and nipping on physiological parameters in relation to productivity of sesame (Sesamum Indicum). *Indian Journal of Agricultural Science*, 75 (3): 143-146.
- SHAW, M.D., KARUNAKARAN, C., and TABIL, L.G. 2009. Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds. *Biosystem Engineering*, 103 (2): 198-207.

- SERRANO, C., MONEDERO, E., LAPUERTA, M., and PORTERO, H. 2011. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw Pellets. *Fuel Processing Technology*, 92: 699-706.
- SOKHANSANJ, J., and TURHOLLOW, A.F. 2004. Biomass densification-cubing operations and cost for corn stover. *Applied Engineering in Agriculture*, 20: 495-499.
- SOKHANSANJ, S., MANI, S., BI, X. T., ZAINI, P., and TABIL, L. (2005). Binderless pelletization of biomass. ASAE Paper No. 056061
- STÅHL, M., BERGHEL, J. 2011. Energy Efficient Pilot-Scale Production of Wood Fuel Pellets Made from A Raw Material Mix Including Sawdust and Rapeseed Cake. *Biomass and Bioenergy*, 35: 4849-54.
- STELTE, W., HOLM, J.K., SANADI, A.R., BARSBERG, S., AHRENFELDT, J., and HENRIKSEN, U.B. 2011. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90, 3285-3290.
- TABIL, L.G. 1996. Pelleting and binding characteristics of alfalfa. Ph. D. Thesis (Unpublished). Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Canada, 219 p.
- TABIL, L.G., and SOKHANSANJ, S. 1996. Pocess conditions affecting the physical quality of alfalfa pellets. *Applied Engineering in Agriculture*, 12: 345-350.
- TABIL, L.G., and SOKHANSANJ, S. 1997. Bulk properties of alfalfa grind in relation to its compaction characteristics. *Applied Engineering in Agriculture*, 13: 499-505.
- TOPAL, M. ve ARSLAN, I. 2008. Biyokütle enerjisi ve Türkiye. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, ss. 241-248, UTES'2008, İstanbul.
- THEERARATTANANOON, K., XU, F., WILSON, J., BALLARD, R., McKINNEY, L., STAGGENBORG, S., VADLANI, P., PEI, Z.J., and 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.
- TUİK. 2014. Bitkisel Üretim İstatistikleri, Tarım ve Orman Alanları, Türkiye İstatistik Kurumu. <http://www.tuik.gov.tr> . [Son erişim tarihi: 26.11.2014]
- TUMULURU, J.S., WRIGHT, C.T., HESS, J.R., and KENNEY, K. L. 2011. A review of biomass denisification systems to develeop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels Bioprod. Biorefin.* 5: 683-707.
- TUMULURU, J. S. 2014. Effect of process variables on the density anddurability of the pellets made from high moisture corn stover. *Biosystem Engineering*, 119: 44-57

- WERTHER, J., SAENGER, M., HARTGE, E.U., OGADA, T., and SIAGI, Z. 2000. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26: 1-27.
- WILSON, T.O. 2010. Factors affecting wood pellet durability. MSc Thesis, The Pennsylvania State University, 78 p.
- YAŞAR, S., GÜLLER, B., ve BAYDAR, H. 2010. Susam, pamuk ve haşhaş saplarında karbonhidrat, lignin miktarları ve bazı lif özellikleri üzerine araştırmalar. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, A (1): 55-56
- ZAMORANO, M., POPOV, V., RODRÍGUEZ, M.L. and GARCÍA-MARAVÉ, A. 2011. A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry logging residues. *Renewable Energy* 36: 3133-3140
- ZAFARI, A., and KIANMEHR, M. H. 2013, Factors affecting mechanical properties of biomass pellet from compost. *Environmental Technology*, 35(4): 477-486

ÖZGEÇMİŞ



Hasan YILMAZ 1986 yılında Burdur'da doğdu. İlk, orta, lise öğrenimini Burdur'da tamamladı. 2005 yılında girdiği Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümü'nden 2011 yılında Ziraat Mühendisi olarak mezun oldu. Ocak 2012'de Süleyman Demirel Üniversitesi'nde başladığı lisansüstü eğitimine 2013 Eylül ayından itibaren Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları A.B.D'nda devam etti. Halen aynı A.B.D'nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.