



Mısır saplarının peletlenmesi ve pelet özelliklerinin belirlenmesi

Pelleting of corn stalk and determination of pellet properties

Hasan YILMAZ

Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, 07070, Antalya, Türkiye

Sorumlu yazar (Corresponding author): H. Yılmaz, e-posta (e-mail): hasanyilmaz@akdeniz.edu.tr

MAKALE BİLGİSİ

Alınış tarihi 28 Mayıs 2018
Düzeltilme tarihi 18 Eylül 2018
Kabul tarihi 19 Eylül 2018

Anahtar Kelimeler:

Biyokütle
Mısır sapı
Pelet

ÖZ

Bu çalışmada, tarımsal üretim alanlarından toplanan mısır saplarının peletlenmesi ve elde edilen peletlerin özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, 6 mm elek delik çapına sahip çekiçli değirmende öğütülmüş, nem içeriği % 14.75, materyal yığın yoğunluğu 120 kg m^{-3} ve geometrik ortalama çapı 1.076 mm olan mısır sapları, 15 kW gücünde ve 8 mm kalıp delik çapına sahip, 70-100 kg h^{-1} üretim kapasitesindeki pelet makinesinde peletlenmiştir. Peletlerin kalite göstergeleri olarak pelet yığın ve parça yoğunluğu, nem içeriği, mekanik dayanıklılık direnci, basınç direnci ve nem alma durumu belirlenmiştir. Ayrıca, peletleme makinesinin kapasitesi ve enerji tüketim değerleri ölçülmüştür. Çalışma sonunda, peletlerin ortalama çapı 8.27 mm, uzunluğu 32.19 mm ve kütlesi ise 2.17 g olarak ölçülmüştür. Fiziksel testler sonunda peletlerin oldukça sağlam yapıda oldukları görülmüştür. Peletlerin yığın yoğunluğu 715 kg m^{-3} , parça yoğunluğu 1264 kg m^{-3} , nem içeriği % 6.24, mekanik dayanıklılık direnci % 96.94, basınç direnci 3060 N ve nem alma durumu % 11.53 olarak bulunmuştur. Peletleme makinesinin üretim kapasitesi 66 kg h^{-1} ve enerji tüketim değeri 15.14 kWh olarak belirlenmiştir.

ARTICLE INFO

Received 28 May 2018
Received in revised form 18 September 2018
Accepted 19 September 2018

Keywords:

Biomass
Corn stalk
pellet

ABSTRACT

Corn stalks have the potential for energy use in the form of pellets. The aim of this study was to pelleting of corn stalks collected from agricultural production areas and determination of pellet properties. In the experiments, pelleting machine with 15 kW motor power, 8 mm die diameter and 70-100 kg h^{-1} production capacity for pelleting of corn stalks was used. The moisture content, bulk density and geometric mean diameter of ground corn stalks were 14.75 %, 120 kg m^{-3} and 1.076 mm, respectively. Pellet physical properties such as pellet bulk density, particle density, moisture content, mechanical durability, compressive resistance and moisture sorption were determined. Also, values of capacity and energy consumption of machines were measured. At the end of study, the average diameter, length and mass of the pellets were measured as 8.27 mm, 32.19 mm and 2.17 g, respectively. The result of physical tests showed that the produced pellets were quite strong due to mechanical durability, compressive resistance, and moisture sorption. The moisture content, bulk density, particle density, compressive resistance and moisture sorption of pellets were founded as 6.24%, 715 kg m^{-3} , 1256 kg m^{-3} , 3060 N and 11.53%, respectively. The average production capacity and energy consumption of pelleting machine were found 66 kg h^{-1} and 15.14 kWh, respectively.

1. Giriş

2017 yılı için ülkemizde toplam 639 bin ha alanda mısır üretimi yapılmış olup 925 kg da^{-1} verim elde edilmiştir (TÜİK 2018). Mısır hasadından sonra ortaya çıkan koçan ve mısır sapları, toprak işleme sırasında toprağa karıştırılarak değerlendirilmekte, hayvan yemi olarak kullanılmakta, doğrudan yakılarak bertaraf edilmekte veya ısı ihtiyaçlarının giderilmesi amacıyla evsel-endüstriyel yakma sistemlerinde yakılmaktadır. Mevcut üretim alanlarındaki mısır sapı potansiyelinin bilinmesi, artık ürün olan mısır saplarının

biyokütle kaynağı olarak kontrollü bir biçimde kullanılması açısından oldukça önemlidir. Başçetinçelik ve ark. (2005) mısır sapı miktarını 0.83 t da^{-1} olarak belirlemiştir. Buna göre 2017 yılı itibarıyla ülkemizde 639 bin ha üretim alanından toplam 5.30 milyon ton mısır sapı biyokütle enerji kaynağı olarak kullanılabilir bir potansiyel oluşturmuştur.

Ülkemiz tarımsal artık potansiyeli bakımından zengin bir ülkedir. Enerji bağımlılığının gelişmişlik faktörünü ve toplumsal refahı etkilediği dönemde kendi enerjisini üretebilen

seviyede olmak son derece önemlidir. Bu nedenle, tarımsal ürün çeşitliliğinin geniş olduğu ve buna bağlı olarak üretim sonrası tarımsal artık potansiyelinin çokluğu, tarımsal artıklardan biyokütle enerjisi elde etmenin önünü açmaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, tarımsal artıkları katı yakıt formuna dönüştürerek yakıt sektörü ve kullanımına yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Tarımsal artıkların, özellikleri iyileştirilmiş katı enerji kaynağı olarak kullanılmasında en etkin yollardan birisi de pelet haline getirilmesi işlemidir (Bilgin ve ark. 2016). Tüm dünyada olduğu gibi, ABD, Kanada ve Rusya gibi ülkelerde de pelet üretimi artmış ve pelet yakıtına en çok talep halen Avrupa Birliği ülkelerindedir (Shan 2017). Mevcut tüketim oranına göre fosil yakıt kaynaklarının önümüzdeki 70 yıl içerisinde tamamen tükeneceği ön görülmektedir (Metzger ve Hüttermann 2009). Fosil yakıtların tükenmek üzere olduğu günümüzde, artan nüfus ve sanayileşmenin doğurduğu enerji ihtiyacı, ülkelerin enerji politikalarını yenilenebilir enerji kullanımına yöneltmiştir. ABD’de 2002’den 2013’e kadar sıkıştırılmış ve peletlenmiş biyokütle kaynaklı enerji üretimi % 60 büyümüştür ve 2008’de 3 milyon ton olan pelet üretim kapasitesi 2014’de 12 milyon tona çıkmıştır (Joyce 2014; Goetzl 2015). Avrupa Birliği Yenilenebilir Enerji Direktifi, 2020 yılında her üye ülkenin enerji üretiminin belirli bir miktarının yenilenebilir enerjiden elde etmesi gerektiğini bildirmiştir (EU Directive 2009/28/EC 2009). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın 2015-2019 stratejik planında, yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etme konusunda programlar mevcut olup 2013 yılında biyokütle kaynaklı kurulu gücün 237 MW olduğu ve 2019’da planlanan kurulu gücün 700 MW olması hedeflenmiştir (ETKB 2016).

Tarımsal artıklar düşük yoğunluk ve yüksek nem içeriklerine sahip oldukları için doğrudan yakılarak kullanımı bazı sorunlara neden olmaktadır. Peletleme işlemi ile kaba formdaki artıkların yoğunluğu artmakta, taşıma ve depolama maliyetleri düşmekte ve düzgün geometrik şekle sahip oldukları için yakma sistemlerinde kolaylıkla yakılabilmektedir. Ayrıca biyokütlenin doğrudan yakılmasının yerine peletlenerek kullanılması, üretim kapasitesini arttırmakla beraber yeni istihdam olanakları da yaratmaktadır (Nishiguchi 2016)

Peletlerin fiziksel özellikleri biçim, çap ve uzunluğu, yığın ve parça yoğunluğu, sertliği ve dayanıklılığıdır (Balasubramanian 2000). 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 ve ark. 2011).

Puig-Arnau ve ark. (2016) yaptığı çalışmada, çayır otu, yonca, sorgum, tiritikale, miskantus ve söğüt materyallerini piston-silindir düzenekli peletleme sisteminde peletlenmiş ve kalıp sıcaklığının pelet kalitesine etkisi incelenmiştir. En kaliteli peletlerin 60-90 °C kalıp sıcaklığında elde edildiğini bildirmişlerdir.

Niedziolka ve ark. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada buğday samanı, kolza sapı ve mısır sapının ikili gruplar halinde

karışımları peletlenmiş ve peletlerin yığın yoğunluğu ve mekanik dayanımlarının materyale göre değişkenlik gösterdiği bildirilmiştir. En düşük yığın yoğunluğu saman peletlerinde (386-420 kg m⁻³) ve en yüksek yığın yoğunluğu ise mısır sapı peletlerinde (561-572 kg m⁻³) elde edilmiştir. En düşük mekanik dayanım kolza sapı peletlerinde (% 95.4-96.8), en yüksek mekanik dayanım ise saman-mısır sapı karışımından elde edilen peletlerde (% 96.8-% 98.9) görülmüştür.

Liu ve ark. (2013b) tarafından yapılan çalışmada bambu ve çeltik sapları, parçacık boyutları 2 mm ve daha düşük boyutta olacak şekilde öğütülmüştür. Peletleme işlemi sonunda bambu ve çeltik sapının yığın yoğunlukları sırasıyla 540 kg m⁻³ ve 640 kg m⁻³, pelet parça yoğunlukları 1250 kg m⁻³ ve 1350 kg m⁻³, dayanıklılık dirençleri ise % 94.21 ve % 98.73 olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada, mısır hasadı sonrası ortaya çıkan mısır sapları katı yakıt olarak değerlendirilmek üzere peletlenmiştir. Pelet kalite göstergeleri olan yoğunluk, mekanik dayanıklılık direnci, basınç direnci ve nem alma durumu gibi fiziksel özelliklerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Denemeler Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü Atölyesinde gerçekleştirilmiştir.

Denemede peletlenecek materyal olarak, Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Aksu Araştırma ve Uygulama Çiftliği’nde yetiştiriciliği yapılan, yaz dönemi sonunda hasat edilen mısır bitkisinin sapları kullanılmıştır. Denemelerde kullanılan materyalin özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Materyallerin peletlenmesinde motor gücü 15 kW, üretim kapasitesi materyal çeşidine bağlı olarak 70-100 kg h⁻¹, pelet boyu 10-40 mm arasında ayarlanabilen peletleme makinası kullanılmıştır. Peletleme makinası, materyal deposu, dairesel sıralı delikli düz kalıp, sıkıştırma silindirleri, pelet boyu ayarlama ünitesi ve elektrik kontrol panosundan oluşmaktadır. Pelet kalıbının çapı 300 mm, giriş delik çapı 11 mm, çıkış delik çapı 8 mm ve kalıp boyu 25 mm’dir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Materyalin Peletlenmesi

Peletleme işlemi için mısır sapları 6 mm elek delik çapına sahip, üzerinde 2 kW gücünde elektrik motoru bulunan, 32 bıçaklı çekiçli değirmende öğütülmüştür. Öğütülen mısır saplarının parçacık boyut dağılımlarının belirlenmesinde 200 mm çapında, 50 mm derinliğinde ve 0.125, 0.25, 0.5, 1, 1.7, 2.36 ve 3 mm delik çaplarında 7 adet elekten oluşan elek analiz seti kullanılmıştır.

Çizelge 1. Denemelerde kullanılan mısır sapının özellikleri.

Table 1. The properties of corn stalks used in the experiments.

Materyal	Nem içeriği (%)			Yoğunluk (kg m ⁻³)		Geometrik ortalama çap (mm)		
	14.75			119		1.076		
Mısır Sapı	Elek Analizi, %							
	0-0.125 mm	0.125-0.25 mm	0.250-0.5 mm	0.5-1.0 mm	1.0-1.7 mm	1.7-2.36 mm	2.36-3.0 mm	>3 mm
	1.63	3.00	12.02	23.67	24.34	16.40	17.20	1.73

Peletleme işleminde materyal, peletleme ünitesine bir kürek yardımıyla sürekli olarak beslenmiştir. Materyal çok kısa bir süre içerisinde kalıp deliklerinde sıkışmaya başlamıştır. Sürtünmelere bağlı olarak oluşan sıcaklık yükselmesi materyal içerisindeki ligninin serbest konuma geçerek yapıştırıcı görevi görmesini sağlamış ve bir süre sonra kalıp deliklerinden peletler sürekli olarak çıkmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Mısır sapı peletleri.

Figure 1. Corn stalk pellets.

2.2.2. Üretim kapasitesi ve enerji tüketimi

Peletleme makinesinin üretim kapasitesinin belirlenmesi için, makine rejime girdikten (peletler çıkmaya başladıktan bir süre sonra) bir dakikalık süre için peletleme makinesinden çıkan peletler bir kaptan toplanmış ve maksimum kapasitesi 2.1 kg olan, 0.01 g hassasiyetli elektronik teraziyle tartılmıştır. Üretim kapasitesi, pelet kütlesinin zamana bölünmesi ile kg h^{-1} olarak belirlenmiştir.

Peletleme makinesinin enerji tüketim değerlerinin ölçülmesinde Chauvin Arnoux CA 8332B 3 fazlı portatif enerji analizörü kullanılmıştır. Makinenin özgül elektrik enerjisi tüketim değeri ise elektrik enerjisi tüketim değerinin üretim kapasitesine oranlanması ile kWh kg^{-1} olarak hesaplanmıştır.

2.2.3. Pelet kalitesi ile ilgili testler

Peletlerin fiziksel özellikleriyle ilgili testler, peletlerin fiziksel kalitelerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Pelet fiziksel özellikleri, parça yoğunluğu, yığın yoğunluğu, mekanik dayanıklılık direnci, nem alma durumu ve basınç direnci göstergeleridir. Fiziksel testler öncesinde peletler 7 gün süre ile 24°C sıcaklık ve % 55 bağıl nem şartlarında bekletilmiştir (Bilgin ve ark. 2016).

Peletlerin mekanik dayanıklılık dirençlerinin belirlenmesinde kullanılan test cihazı EN 15210-1 (2009) standardına göre yapılmıştır.

Peletlerin nem alma durumlarının belirlenmesinde sıcaklık çalışma sınırları $+10\dots+60^\circ\text{C}$ ($\pm 2^\circ\text{C}$), nem çalışma sınırları % 20...% 95 (± 5), zaman ayarlı, maksimum güç değeri 2.0 kW ve 252 litre hacminde olan iklimlendirme test kabini kullanılmıştır.

Peletlerin basınç direncinin (sertlik) belirlenmesinde piston ilerleme hızı 1 mm s^{-1} olan ve uygulanan yüklerin anında bilgisayara aktarılıp izlenebildiği hidrolik tip basınç direnci test cihazı kullanılmıştır.

Peletleme makinesinin enerji tüketim değerinin belirlenmesi için 230 V, 50 Hz şehir şebekesinden alınan elektrik hattıyla makine güç hattı arasına bağlanan faz-faz arası gerilim, her fazdan çekilen akım ve görünür güç değerleri, pelet üretimi

boyunca saniye bazında ölçülerek makinenin güç tüketimi belirlenmiştir. Elde edilen veriler cihaz üzerinden bilgisayara aktarılarak kaydedilmiştir.

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

Peletlerin yığın yoğunluğu EN 15103 (2009) standardına göre belirlenmiştir. Bu yöntemde, peletler 5 litre hacmindeki kabin silme doldurularak kap içindeki toplam pelet miktarının tartılmasıyla belirlenmiştir. Pelet yığın yoğunluğu pelet kütlesinin kabin hacmine oranlanması ile kg m^{-3} olarak hesaplanmıştır.

Peletlerin parça yoğunlukları EN 16127 (2012) standardına göre belirlenmiştir. Bu yöntemde 80-100 g kütleye sahip pelet örnekleri (yaklaşık 100 adet) rastgele alınmış ve her bir peletin çapı, uzunluğu ve kütlesi ölçülerek kaydedilmiştir. Pelet parça yoğunluğu, pelet kütlesinin pelet hacmine bölünmesi ile kg m^{-3} olarak hesaplanmıştır.

Peletlerin mekanik dayanıklılık dirençleri EN 15210-1 (2009) standardına göre belirlenmiştir. Test öncesi 500 ± 10 g pelet örnekleri test cihazına yerleştirilmiş ve 10 dakika süreyle $50\pm 2 \text{ min}^{-1}$ 'da döndürülmüştür. Test sonrası peletler dışarı alınmış ve 3.15 mm çaplı yuvarlak delikli elek kullanılarak elenmiştir. Peletlerin mekanik dayanıklılık dirençleri test öncesi ve sonrası meydana gelen kütle kaybına bağlı yüzde (%) olarak hesaplanmıştır.

Pelet basınç direnci, peletin kırılmadan (parçalanmadan) önceki dayanabileceği maksimum kırılma yükü olarak tanımlanmakta ve pelet sertliği çoğunlukla basınç direnci (sıkıştırma direnci) testi yoluyla belirlenmektedir (Kaliyan ve Morey 2009). Sertlik değeri en yüksek olan pelet, yüksek kaliteli olarak değerlendirilmektedir (Celma ve ark. 2012). Bu teste, pelet örneklerinden 10 adet pelet ayrı ayrı iki plaka arasına yerleştirilmiş ve yukarıdan tek yönlü sıkıştırma kuvveti uygulanmıştır. Uygulanan sıkıştırma kuvveti sabit oranda artarak pelet kırılıncaya kadar devam etmiş ve uygulama yükleri test süresince bilgisayara aktarılmıştır. Test öncesi pelet çap ve uzunlukları dijital kumpas ile ölçülerek kaydedilmiştir. Peletlerin basınç direnci N, peletlerin özgül basınç direnci ise basınç direncinin pelet uzunluğuna oranlanması yoluyla N mm^{-1} olarak hesaplanmıştır.

Peletlerin nem alma durumları iklimlendirme test kabini kullanarak belirlenmiştir. Liu ve ark. (2013a) peletlerin nem alma durumunun pelet kütlesindeki değişim yoluyla belirlenebileceğini belirtmiştir. Bu yöntemde pelet örnekleri içerisinden rastgele seçilen 5 adet pelet iklimlendirme test kabine konulmadan önce ETÜV'de 24 saat süre ile 105°C 'de kurutulmuş, fırın kurusu pelet örnekleri 24 saat süre ile iklimlendirme test kabinde 27°C ve % 90 nemde bekletilmiştir. Test sonunda peletlerdeki kütle artışına bağlı olarak pelet nem alma durumu % olarak hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Üretim kapasitesi ve enerji tüketim değerleri özellikle materyal çeşidine, materyal parçacık boyut dağılımına, materyal nem içeriğine, materyalin makineye beslenme şekline ve beslenen materyal miktarına bağlı olarak değişmektedir (Bilgin ve ark. 2016). Bilgin ve ark. (2015) üretim kapasitesini fındık zuru için 67 kg h^{-1} ve Bilgin ve ark. (2016) çay fabrikası artıkları için ise 46 kg h^{-1} bulmuşlardır.

Makinenin enerji tüketimi 15.14 kWh, özgül enerji tüketimi ise 230 kWh t⁻¹ olarak bulunmuştur. Jackson ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada özgül enerji tüketimi nem içeriğine ve materyale bağlı olarak 101-324 kWh t⁻¹ arasında elde edilmiş ve üretim kapasitesinin artması özgül enerji tüketimini düşürdüğü belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür verileri ile benzerlik gösterdiği söylenebilir.

Denemelerde elde edilen mısır peletlerinin kısa ve elementel analiz sonuçları Çizelge 2’de, pelet kalitesi ile ilgili fiziksel özellikler Çizelge 3’te verilmiştir.

Pelet nem içeriği, peletler elde edildikten 7. gün sonunda % 6.24 olarak belirlenmiştir. Peletleme işlemi süresince materyal ve kalıp arasındaki sürtünmelerden kaynaklanan sıcaklık yükselmesi, materyal nem içeriğinin çok fazla düşmesine neden olmuştur. Avrupa Pelet Konseyi tarafından odun ve türevlerinden elde edilen peletlerle (ENplus-A1, ENplus-A2) diğer bitkisel ürünlerden elde edilen peletler (ENplus-B) için pelet standartları açıklanmıştır (EN 14961-6 2010; EN 14961-2 2013). Elde edilen mısır sapı peletlerinin nem içeriği standartta kabul edilebilir değerler içinde olduğu görülmektedir. Peletleme sonrası nem içeriğinin korunabilmesi ve ortam koşullarından etkilenmemesi için üretim sonrası peletlerin soğutulması fiziksel stabilite için sağlanması, ardından hemen paketlenmesi gerekmektedir. Peletlerde nem içeriği depolama, yanma ve fiyat belirleme açısından kritik düzeyde önem taşımaktadır (Nyström ve Dahlquist 2004). Yüksek kalitede pelet üretebilmek için materyal nem içeriğinin kontrol altında tutulması ve optimum peletleme neminin tespit edilmesi gerekmektedir (McKeown 2017). Peletlerin yakılması sırasında enerji, ilk olarak peletlerdeki nemin buharlaşmasını sağlayacağı için, pelet nem içeriği yanma sürecini doğrudan etkilemektedir (Gil ve ark. 2010).

Mısır saplarından elde edilen peletlerin yığın yoğunluğu 715 kg m⁻³ ve parça yoğunluğu ise 1264 kg m⁻³ olarak bulunmuştur. Peletleme işlemi ile hammadde yoğunluğuna göre, pelet parça yoğunluğu dikkate alındığında yaklaşık 11 kat, yığın yoğunluğu dikkate alındığında göre ise yaklaşık 7 kat daha yoğun ürün elde edilmiştir. Bu da özellikle taşıma, nakliye işlemlerini kolaylaştıracak ve nakliye ile depolama masraflarının azalmasına ciddi oranda katkı sağlayacaktır. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan biyokütlenin peletlenmesi ile ilgili çalışmalarda pelet parça yoğunlukları 850-1270 kg m⁻³, pelet yığın yoğunlukları ise 350-705 kg m⁻³ aralığında elde edilmiştir (Colley 2006; Mani ve ark. 2006; Bergström ve ark. 2008; Fasina 2008; Samuelsson ve ark. 2009; Razuan ve ark. 2011; Theerarattananoon ve ark. 2011; Celma ve ark. 2012). Mısır sapının peletlenmesi ile elde edilen parça ve yığın

yoğunluğu değerleri literatürde verilen değerlerin üst sınırında yer almıştır. ENplus-A1, Enplus-A2 ve EN-B sınıfı pelet standartlarında tarımsal artıklar ve enerji bitkileri için yığın yoğunluğu değerinin $\geq 550-600$ kg m⁻³ olması gerektiği belirtilmiştir (EN 14961-6 2010; EN 14961-2 2013). Elde edilen mısır sapı peletleri için pelet yığın yoğunluğu değerleri standartların oldukça üstünde bulunmuştur.

Çalışmada, peletlerin mekanik dayanıklılık direnci % 96.94 olarak bulunmuştur. Mekanik dayanıklılık direnci, peletlerin mekanik ya da pnömatik sistemlerle taşınması, nakliye araçlarına yüklenilmesi veya boşaltılması, ambalaj veya paketleme sırasında karşılaşılabilecek kuvvetlerin simülasyonu açısından önemlidir. Dayanıklılık direnci testi pelet kalitesinin kontrol edilmesine yardımcı olmaktadır ve % 80-90 aralığında dayanıklılık direncine sahip peletler yüksek kaliteli peletler olarak tanımlanmaktadır (Kaliyan and Morey 2009). Avrupa Pelet Konseyi ENplus-A1 ve ENplus-A2 sınıfı pelet standartlarına göre tarımsal materyaller ve enerji bitkileri için materyal çeşidine bağlı olarak ≥ 96 ve ≥ 97.5 olması gerektiğini belirtilmiştir (EN 14961-6 2010; EN 14961-2 2013). Peletlerin mekanik dayanım değerinin standartlara uygun olduğu ve kaliteli sınıfına girdiği görülmektedir.

Dayanıklılık testi sonrası peletlerde az da olsa ufalanmanın meydana geldiği, bazı peletlerin uçlarından kırıldığı fakat yine de peletlerin formunu kaybetmediği gözlenmiştir.

Peletlerin basınç dirençleri, peletlerin ambalaj paketleri veya silolarda depolanması, taşıma ve nakliye süresince üstteki peletlerin alttakilere uygulamış olduğu yüklerin simülasyonu için yapılmaktadır (Kaliyan ve Morey 2009). Peletlerin basınç ve özgül basınç direnci değerleri 3060 N ve 92.42 N mm⁻¹ olarak belirlenmiştir. Celma ve ark. (2012) domates posasından elde ettikleri peletler için en yüksek basınç direnci değerini 88 N olarak, Garcia-Maraver ve ark. (2010) zeytin dalı ve yaprakları için basınç direncini 40-220 N arasında, Bilgin ve ark. (2015) fındık zuruğu peleti için basınç direncini 3040 N, Bilgin ve ark. (2016) çay artıklarından elde ettikleri peletler için basınç direncini 476 N, özgül basınç direncini ise 18.67 N mm⁻¹ olarak belirlemiştir. Görüldüğü gibi basınç direnci için elde edilen değerler literatürde verilen değerlerin oldukça üstünde bulunmuştur.

Peletlerin kapalı ortam şartlarında bekletilmesi süresince, ortamın sıcaklık ve bağıl nem düzeyinde fiziksel değişimlerini gözlemek amacıyla gerçekleştirilen test sonunda peletlerin nem içeriği % 11.53 düzeyine çıkmıştır. Bu değer, EN 14961-1 (2010) standardında belirlenen < % 10 sınır değerinin üzerindedir.

Çizelge 2. Kuru bazda mısır sapı peletlerinin kısa ve elementel analiz sonuçları.

Table 2. Proximate and ultimate analysis results of corn stalk pelet in dry basis.

Ürün	Kısa analiz			Elementel analiz				Alt ısıl değer (MJ kg ⁻¹)
	Kül içeriği (%)	Uçucu madde (%)	Sabit karbon (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	
Mısır sapı peleti	7.24	74.05	18.71	41.67	5.60	0.86	44.63	16.02

Çizelge 3. Mısır sapı peletinin kalitesi ile ilgili fiziksel özellikleri.

Table 3. The physical properties of corn stalk pellets.

Ürün	Nem içeriği (%)	Parça yoğunluk (kg m ⁻³)	Yığın yoğunluk (kg m ⁻³)	Dayanıklılık direnci (%)	Sıkıştırma direnci (N)	Nem alma durumu (%)
Mısır sapı peleti	6.24	1264	715	96.94	3060	11.53

Liu ve ark. (2013a) ve Yılmaz (2014) farklı biyokütle materyalleri için peletlerin mekanik dayanıklılık direncinin yüksek olmasının peletlerin iklimlendirme kabiniinde daha az nem aldıklarını belirlemiştir. Elde edilen sonuçlar Liu ve ark. (2013a) ve Yılmaz (2014) tarafından elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermiştir.

4. Sonuç

Çalışmada, Antalya ilinde biyokütle potansiyeline sahip olan mısır bitkisinin hasat edildikten sonra artık ortaya çıkan mısır sapları, biyokütle peleti elde edilmek üzere kolayca öğütülerek peletlenebilmiştir. Elde edilen mısır sapı peletlerinin peletleme koşulları ve pelet özellikleriyle ilgili elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- 6 mm elek delik çapında öğütülmüş, % 14.75 nem içeriğindeki mısır sapları herhangi bir yapıştırıcı madde kullanılmadan yüksek kalitede peletlenmiştir.

- Peletlerin parça ve yığın yoğunluklarının oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir.

- Peletlerin mekanik dayanıklılık direnci oldukça yüksek bulunmuştur.

- Mevcut peletleme makinesi ve peletleme koşullarında pelet üretim kapasitesi 66 kg h^{-1} , peletleme makinesinin özgül enerji tüketimi 15.14 kWh olarak hesaplanmıştır.

- Depolama koşullarının 27°C ve % 90 bağıl nem düzeyinde olması, pelet nem içeriğinin standartlarca belirlenen seviyenin üstünde çıkmasına neden olmuştur.

Katı yakıtlarda kalite göstergelerinden olan ısı değeri ve kül içeriği açısından değerlendirildiğinde, çalışma kapsamında üretilen mısır sapı peletlerinin ısı değeri ve kül içerikleri sırasıyla 16.02 MJ kg^{-1} ve % 7.24 olarak bulunmuştur (Çizelge 2). Ülkemizde yüksek miktarda rezerve sahip olan fosil kaynaklı katı yakıtlardan linyit kömürlerinin % 90'ının alt ısı değerlerinin 12 MJ kg^{-1} 'in altında, kül içeriğinin % 25-30 değerleri arasında olduğu bildirilmiştir (TKİ 2015). Çalışma kapsamında üretilen mısır sapı peletlerinin yakıt özelliklerinin linyit kömürü yakıt özelliklerinden daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

Antalya ilinde ve ülke genelinde oldukça fazla miktarda artık potansiyeli bulunan mısır bitkisi saplarının, mısır sapı+kömür tozu, mısır sapı+diğer biyokütle kaynakları karışımlarından da pelet elde edilmesi ve pelet yakma sistemlerinde yanma verimi, emisyon değerleri gibi yanma parametrelerinin belirlenerek ilgili yönetmeliklere uygunluğunun araştırılması gerekmektedir.

Kaynaklar

Balasubramanian D (2000) Physical properties of raw cashew nut. Journal of Agricultural Engineering Reserach 78: 291-297.

Başçetinçelik A, Karaca C, Öztürk HH, Kacıra M, Ekinci K (2005) Agricultural biomass potential in Turkey. Proceedings of the 9th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture & 27th International Conference of CIGR Section IV: The Efficient Use of Electricity and Renewable Energy Sources in Agriculture, Sep. 27-29, İzmir-TURKEY.

Bergström D, Israelson S, Öhman M, Dahlqvist S, Gref R, Boman C, Wasterlund I (2008) Effects of raw material

particle size distribution on the characteristics of scots pine sawdust fuel pellets. Fuel Processing Technology 89: 1324-1329.

Bilgin S, Yılmaz H, Koçer A, Acar M, Dok M (2015) Fındık zuruğunun peletlenmesi ve pelet fiziksel özelliklerinin belirlenmesi. Tarım Makinaları Bilim Dergisi 11: 265-273.

Bilgin S, Koçer A, Yılmaz H, Acar M, Dok M (2016) Çay fabrikası atıklarının peletlenmesi ve pelet fiziksel özelliklerinin belirlenmesi. JAFAG (2016) 33 (Ek sayı), 70-80.

Celma AR, Cuadros F, Rodriguez FL (2012) Characterization of pellets from industrial tomato residues. Food and Bioproducts Processing 90: 700-706.

Colley ZJ (2006) Compaction of switchgrass for value added utilization. M. Sc. Thesis, The Graduate Faculty of Auburn University.

EN 15210-1 (2009) Solid Biofuels. Determination of Mechanical Durability of Pellets and Briquettes – Part 1: Pellets.

EN 15103 (2009) Solid Biofuels. Determination of Bulk Density.

EN 14961-1 (2010) Solid biofuels – Fuel Specification and classes, Part 1 – General requirements.

EN 14961-6 (2010) Non-Woody Pellets for Non- Industrial Use.

EN 16127 (2012) Solid Biofuels. Determination of Length and Diameter of Pellets.

EN 14961-2 (2013) Solid Biofuels - Fuel Specification and Classes – Part 2: Wood Pellets for Non-Industrial Use.

ETKB (2016) Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2015-2019 Stratejik Planı. <http://www.enerji.gov.tr>. Erişim 21 Mayıs 2018.

EU Directive 2009/28/EC (2009) On the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing directives 2001/77/ec and 2003/30/ec.

Fasina OO (2008) Physical properties of peanut hull pellets. Bioresource Technology 99: 1259-1266.

Garcia-Maraver A, Ramos-Ridao AF, Ruiz DP, Zamorano M (2010) Quality of pellets from olive grove residual biomass. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada-Spain.

Gil MV, Oulego P, Casal MD, Pevida C, Pis JJ, Rubiera F (2010) Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. Bioresource Technology 101(22): 8859-8867.

Goetzl A (2015) Developments in the global trade of wood pellets. Office of industries working paper, US International Trade Commission.

Jackson J, Turner A, Mark T and Montross M (2016). Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill”, Fuel Processing Technology 148, 43-9.

Joyce M (2014) Biofuels production drives growth in overall biomass energy use over past decade. Retrieved from: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=15451>.

Kaliyan N, Morey RV (2009) Factor affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass and Bioenergy 33: 337-359.

- Lehtikangas P (2001) Quality properties of pelletized sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy* 20: 351-360.
- Liu Z, Jiang Z, Cai Z, Fei B, Yu Y, Liu X (2013a) Effects of carbonization conditions on properties of bamboo pellets. *Renewable Energy* 51: 1-6.
- Liu Z, Lie X, Fei B, Jiang Z, Cai Z, Yu Y (2013b) The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. *Renewable Energy* 55: 1-5.
- Mani S, Tabil LG, 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.
- McKeown MS, Trablesi S, Nelson SO, Tollner EW (2017) Microwave sensing of moisture in flowing biomass pellets. *Biosystem Engineering* 155: 152-160.
- Metzger JO, Hüttermann A (2009) Sustainable global energy supply based on lignocellulosic biomass from afforestation of degraded areas. *Naturwissenschaften* 96(2): 279-288.
- Niedziółka I, Szpryngiel M, Kachel-Jakubowska M, Kraszkiewicz A, Zawislak K, Sobczak P, Nadulski R (2015) Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy* 76: 312-317.
- Nishiguchi S, Tabata T (2016) Assessment of social, economic, and environmental aspects of woody biomass energy utilization: Direct burning and wood pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57: 1279-1286.
- Nyström J, Dahlquist E (2004) Dahlquist methods for determination of moisture content in woodchips for power plants—a review. *Fuel* 83(7): 773-779.
- Puig-Arnabat M, Shang L, Sáróssy Z, Ahrenfeldt J, Henriksen UB (2016) From a single pellet press to a bench scale pellet mill — Pelletizing six different biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology* 142: 27-33.
- Razuan R, Finney KN, Chen Q, Sharifi VN, Swithenbank J (2011) Pelletised fuel production from palm kernel cake. *Fuel Processing Technology* 92(3): 609-615.
- Samuelsson R, Thyrel M, Sjöström M, Lestander TA (2009) Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology* 90: 1129-1134.
- Shan F, Lin Q, Zhou K, Wu Y, Fu W, Zhang P, Song L, Shao C, Yi B (2017) An experimental study of ignition and combustion of single biomass pellets in air and oxy-fuel. *Fuel* 188: 277-284.
- Sokhansanj J, Turhollow AF (2004) Biomass densification-cubing operations and cost for corn stover. *Applied Engineering in Agriculture* 20: 495-499.
- Theerarattananoon K, Xu F, Wilson J, Ballard R, McKinney L, Staggenborg S, Vadlani P, Pei ZJ, 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.
- TKİ (2015) Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu. 2015 Kömür (Linyit) Sektör Raporu, Mayıs 2016.
- Tumuluru JS, Wright CT, Hess JR, Kenney KL (2011) A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 5: 683-707.
- TÜİK (2018) Bitkisel Üretim İstatistikleri, Tarım ve Orman Alanları, Türkiye İstatistik Kurumu. <http://www.tuik.gov.tr> . Erişim 17 Mayıs 2018.
- Yılmaz H (2014) Bazı Tarımsal Artıkların Peletlenmesi ve Pelet Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma. Antalya: Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Antalya.