



# Pamuk Sapı Artıklarından Pelet Yakıtı Üretiminde Uygun Nem İçeriği ve Parçacık Boyutunun Belirlenmesi

Mahmut DOK<sup>1,\*</sup>, Mustafa ACAR<sup>1</sup>, Ufuk AKBAŞ<sup>1</sup>, Canbey TABAĞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Tekkeköy-Samsun, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

Makale Gönderim 29/03/2024  
Revizyon 21/05/2024  
Kabul 25/05/2024

### Anahtar Sözcükler:

Tarımsal artık  
Pamuk sapı  
Yakıt pelet

## ÖZET

Tarımsal artıkların katı yakıt formunda enerji kaynağı olarak kullanılması hem dünyada hem de ülkemizde büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla tarımsal artıkları enerji üretiminde etkili ve kolay bir şekilde kullanmanın bir yolu, bunları kurutmak, öğütmek ve ardından pelet haline getirmektir. Bu çalışmanın amacı ülkemizde yaygın tarım artıklarından biri olan pamuk saplarının katı yakıt peleti olarak değerlendirilmesi ve peletleme için uygun malzeme nem içeriği ve partikül boyutunun belirlenmesidir. Çalışma sonucunda, kullanılan pamuk sapının kalorifik değer, kül içeriği ve pelet dayanıklılık direnci açısından standartları karşılamasına rağmen pelet kütle yoğunluğu açısından standartların altında olduğu görülmüştür. Pamuk sapı için en uygun parçacık boyutunun 4 ile 6 mm arasında, en uygun malzeme neminin ise %12 ile 16 arasında olduğu gözlemlenmiştir.

## 1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde fosil yakıtların enerji üretimindeki payının oldukça yüksek olması, nüfus artışıyla enerji kaynaklarının kullanımında meydana gelen artış, fosil yakıt rezervlerinin sürekli azalmasına ve çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu durum tüm insanlık için bir tehdit hali taşımaktadır. Bu sebeplerden dolayı birçok ülke varlıklarını ve bağımsızlıklarını koruyabilmek için yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını araştırmaya yönelmiş, bu konuda da yenilenebilir enerji tarımı ön plana çıkmıştır. Biyokütle, dünyada en büyük dördüncü enerji kaynağını oluşturması yönüyle önemli bir enerji kaynağı konumunda yer almaktadır. Birçok gelişmiş ülke biyoenerjiyi geleceğin temel enerji kaynağı olarak görmektedir (Kapluhan, 2014). Katı biyokütle gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak yakıt enerjisi olarak kullanılmaktadır. Dünya çapında yaklaşık 2,9 milyar insan günlük yemek pişirmek için katı biyokütleyle güvenmekte ve Afrika'daki bazı ülkelerde odunsu biyokütle ve tarımsal artıklar, toplam evsel enerji tüketiminin

%90'ından fazlasını oluşturmaktadır. İklim değişikliği tehdidinin bir sonucu olarak, yenilenebilir kaynakların kullanımı yoluyla temiz enerji üretimine odaklanan yeni bir endüstrinin yaratılması için biyokütle ve biyokütle kalıntılarının kullanımı son derece önemli hale gelmiştir. Ancak düşük yoğunluk, yüksek nem içeriği, taşıma, depolama ve nakliye gibi faktörler biyokütle kullanımının bazı dezavantajlarıdır. Peletleme, biyokütleyle bu dezavantajları en aza indirmek amacıyla yoğunlaştırma yoluyla daha kullanışlı bir forma dönüştüren gelecek vaat eden bir teknolojidir. Talaş, odun yongaları, ağaç kabuğu, atık, zirai ürünler, ekin sapları, fındık, badem, ceviz kabukları, hatta atık kâğıt gibi maddelerin öğütüldükten sonra yüksek basınç altında sıkıştırılması sonucu elde edilen pelet, genellikle 6-8 mm çapında, 4-40 mm arasında uzunluğunda, silindirik yapıya sahip tamamen doğal bir yakıttır (Küsek vd., 2015). Pelet yakıtının sürdürülebilir bir kaynak olması, fosil kaynaklı yakıt ithalatını azaltarak ülke ekonomisine katkı sağlaması, kullanımı sonrası atık miktarının az olması, zararlı egzoz emisyonlarının kabul sınırlarda olması, ferdi



sistemler için paket halinde satın alınabilir olması, nakliyesinin çok kolay olması, merkezi ısıtma sistemleri için binanın deposuna bir hortum ve pompa sistemi ile nakledilerek depolanabilmesi ve otomatik besleme yapılabilmesi gibi birçok açıdan avantaj sağlamaktadır (Sungur vd., 2018). Biyoenerji kaynaklarının içerisinde yer alan pelet, ısınma ve sanayi amaçlı olarak kullanılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en büyük özellikleri, sürekli tekrarlanabilir olmaları ve kendilerini hızlı bir şekilde yenileyebilmeleridir. Biyokütle de bu enerji kaynaklarından biri olup, son yıllarda mevcut artık potansiyelinden dolayı dikkate alınması gereken enerji kaynaklarının başında gelmektedir (Demirel ve Gürdil, 2018). Yenilenebilir enerji olarak pelet üretiminde kullanılacak artık maddelerinde süreklilik aranması, peletlerin stabilitesini garanti edecek hammaddelerin geliştirilmesiyle ilişkilidir. Peletlerin stabilitesi, hammaddelerin bileşiminin dengelenmesiyle elde edilebilir. Hammaddenin bileşimi, bitki biyokütlesinden pelet üretiminde önemli bir unsurdur (Kazimierz vd., 2020). Biyokütle enerjisi dünyada kömür ve petrolden sonra en büyük birincil enerji kaynağıdır ve dünya nüfusunun yarısından fazlası birincil enerji kaynağı olarak biyokütle kullanılmaktadır. Biyokütle kaynakları bakımından zengin bir potansiyele sahip olan ülkemizde, yılda ortalama 50 milyon ton çeşitli tarımsal ürün üretilmektedir ve bu artıkların kullanım oranları oldukça düşüktür (Karaca vd., 2016).

Türkiye’de 2021 yılında 4,3 milyon da alanda 2,25 milyon ton kütlü pamuk üretimi gerçekleştirilmiştir (Pamuk bülteni, 2022). Bir dekar pamuk tarlasından yaklaşık 300 ile 400 kg arasında pamuk sapı çıkmaktadır. Ortalama 350 kg/da olarak hesaplandığında ise, yaklaşık 1,5 milyon ton artık ortaya çıkmaktadır. Bunun yarısının pelet yapımında kullanılması durumunda, 750.000 ton pelet elde edilir ki, bu miktar katı yakıt, odunun ve kömürün kullanıldığı her yerde rahatlıkla kullanılacak bir yakıttır.

Pelet yakıtı, ısınma ve sanayi amaçlı yakma sistemlerinde kullanılabilir. Biyokütle yakıtı olan pelet yakıtının fosil yakıtlara oranla daha yüksek uçucu içeriği, düşük sabit ve toplam karbon içeriği, yüksek oksijen içeriği, düşük ateşlenme sıcaklığı, yüksek yanma hızı ve ısı değere sahip olduğunu bilinmektedir. Pelet, dünyanın birçok ülkesinde yaygın olarak kullanılmakta olup çevreye zararı çok az olan bir yakıt türü olması nedeniyle avantaj sağlamaktadır. Odun peletleri, doğrudan odun yakılması biçiminde elde edilen enerjiye kıyasla 4 ile 10 kat daha yoğun bir yakıt olduğunu ortaya

koymaktadır. Pelet yakıtının bu yüksek yoğunluğu (650 kg/m<sup>3</sup>) yoğun bir depolama ve uzak mesafelere uygun ve ucuz nakliye sağlığını sağlamaktadır (Anonim, 2023). Türkiye’de pelet üretmek için yeterli hammadde kaynağı ve potansiyel bir pazar bulunmasına rağmen, henüz üretim ve kullanımı yaygın değildir. Pelet üretmek ve kullanmak hem çevre kirliliğini önlemekte hem de ülke ekonomisinin dışa bağımlılığını azaltmaktadır. Dünyadaki pelet kullanımına baktığımızda yaklaşık 40 yıldır aktif olarak kullanılan bir yakıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Türkiye yaklaşık 40 yıllık bir gecikmenin ardından son 5 yıldır aktif olarak üretim sağlayan ve talebin çok küçük bir bölümünü karşılayan üretim mevcuttur (Anonim, 2023).

Ülkemizde her yıl yaklaşık 50 milyon ton tarımsal artık elde edilmektedir. Bu atık ve artıkların bir kısmı farklı şekillerde değerlendirilmekte, ama yaklaşık 15-20 milyon tonluk kısmı değerlendirilmeyip tarlalarda kalmakta veya gelişigüzel yakılarak imha edilmeye çalışılmakta, bu durum da birçok sıkıntıya sebep olmaktadır (Acar, 2021). Pamuk sapı da bunlardan birisidir. Ülkemizin önemli bir endüstri bitkisi olan pamuk, Ege, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yetiştirilmektedir. Pamuk sapının pelet yapımı için önemli bir alternatif hammadde olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, ülkemizde bu kadar büyük bir potansiyele sahip bu tarımsal artıkların herhangi bir şekilde değerlendirilememesi hem ülke ekonomisi açısından hem de çevresel faktörler açısından büyük bir kayıp olduğu düşünülmektedir. Yapılan bu çalışmayla pamuk sapı artıklarının katı yakıt pelet olarak değerlendirilmesi, pelet olmalarına engel olan faktörlerin belirlenmesi ve belirlenen bu faktörlerin ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan pamuk sapsapları, Adana’da faaliyet gösteren Doğu Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü’nden temin edilmiştir. Kullanılan pamuk çeşidi tek bir çeşit olmayıp denemelerde kullanılan farklı çeşitlerin karışımlarıyla elde edilmiştir. Materyallerin peletlenmesinde pelet çapı 6 mm, motor gücü 15 kW, kapasitesi materyal çeşidine bağlı olarak 50-100 kg/h arasında değişikli gösteren ve pelet boyu 10-40 mm arasında ayarlanabilen peletleme makinesi kullanılmıştır. Peletleme makinesi materyal deposu, dairesel sıralı delikli düz kalıp, sıkıştırma silindri, pelet boyu ayarlama ünitesi ve elektrik kontrol panosundan oluşmaktadır. Kullanılan pelet kalıbı, düz kalıp olup dairesel sıralı

deliklere sahiptir.

## 2.2. Metot

Pamuk sapları, önce çekiçli değirmende 4 farklı delik çapında (2 mm, 4 mm, 6 mm ve 8 mm) elekler kullanılarak parçalanmıştır. Daha sonra 10 ar kilogramlık 4 adet alt çuvalara ayrılarak 4 farklı nem için (% 8, 12, 16 ve 20) hazırlanmıştır. Materyal nem içeriklerinin hazırlanmasında, nem değerleri ölçülerek, istenilen nemin üstündekiler, kurutma ünitesinde kurutularak düşürülmüş, düşük neme sahip materyaller de sisleme şeklinde nemlendirilerek yükseltilmişlerdir. Peletlemeden önce hammadde yoğunluğu belirlenmiş, ardından peletleme işlemine geçilmiştir. Çalışma tesadüf parsellerinde faktöriyel demene deseninde üç tekerrürlü olarak yürütülmüştür. İstenilen parçacık boyutuna ve nem içeriğine getirilen materyaller, enstitümüz Enerji Tarımı Araştırma Merkezi bünyesindeki biyokütle ünitesinde bulunan pelet makinasında peletlenmiştir. Elde edilen veriler JMP istatistik paket programı kullanılarak analiz edilmiştir. Denemede, Isıl değer (kcal/kg), pelet nem miktarı (%), pelet kül içeriği (%), hammadde için yığın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ), pelet yığın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ), nem alma direnci (%), mekanik dayanıklılık direnci (%) ve kırılma direnci (%) değerleri incelenmiştir.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Pamuk sapı kullanılarak yapılan peletleme çalışmalarında materyal nemi ve parça boyutu verileri Çizelge 1 de; materyal nemi x parça boyutu interaksyonunun yer aldığı veriler Çizelge 3 de verilmiştir. Pamuk sapının % 8 nem oranı olan uygulamasından materyal neminin düşük olması nedeniyle pelet elde edilememiş, çalışmaya materyal nem oranının % 12, 16 ve 20 olan uygulamalarıyla devam edilmiştir.

### Isıl Değer(Kcal/kg)

Çizelgelerde görüldüğü gibi, pamuk sapının ısı değeri, ortalama 4324 kcal/kg olarak belirlenmiştir. Parça boyutu ve materyal neminin ısı değeri üzerine etkileri önemli bulunmuştur. Ayrıca materyal nemi-parça boyutu interaksyonu da 0,01 seviyesinde önemli bulunmuştur. Materyal nemi azaldıkça, ısı değeri yükselmiş ve yine parça boyutu büyüdükçe ısı değeri yükselmiştir. En yüksek ısı değeri, 8 ve 6 mm parça boyutlarının % 12 nem içeriğindeki örneklerde 4395 ve 4391 kcal/kg olarak bulunmuştur. Elde edilen peletlerde yapılan analizler sonucunda, ısı değerinin TS EN ISO 17225-6 pelet standart değerleri içerisinde yer aldığı görülmüştür (Çizelge:5).

## Pelet Nem İçeriği (%)

Pamuk sapının katı yakıt olarak kullanıldığı peletleme çalışmalarında materyal nemi ve parça boyutu verileri, Çizelge 1 de, interaksyonlarının yer aldığı veriler de Çizelge 3 de verilmiştir. Çizelgelerde de görüldüğü gibi, peletlerde ortalama nem, % 8,45 olarak belirlenmiştir. Materyalin nem içeriği arttıkça pelet nem içeriğinin de arttığı görülmüştür. En yüksek pelet nem içeriği % 9,06 ile % 20 hammadde nemi olan materyalden elde edilirken, bunu sırasıyla %8,37 ve %7,93 pelet nem içeriğiyle % 16 ve 12 nem içeriğine sahip materyaller takip etmiştir. Parçacık boyutu incelendiğinde ise, materyal parça boyutu azaldıkça pelet nem içeriğinde de artış görülmüştür (Çizelge:1). Elde edilen peletlerde yapılan analizler sonucunda, pelet nemi değerlerinin Çizelge 5 deki pelet standart değerleri içerisinde yer aldığı görülmüştür.

## Kül İçeriği (%)

Pamuk sapından elde edilen peletin ortalama kül içeriği % 3,95 olarak belirlenmiştir. Çizelge 1 incelendiğinde, materyal nem miktarı arttıkça kül içeriğinde azalma görülmüştür. Materyal nemi % 20 olduğu konudan en düşük kül içeriği elde edilmiştir. 6 mm materyal parçacık boyutundan elde edilen peletlerin kül içeriğinin ne yüksek değerde (% 4,33) olduğu belirlenmiştir. En düşük kül içeriği değerinin (%3,70) ise 8 mm materyal parçacık boyutundan elde edilen peletlerde olduğu görülmüştür. 2 ve 4 mm parça boyutu aynı grupta yer alırken, istatistiki fark önemli bulunmuştur. Çizelge 3 incelendiğinde ise, materyal nemi ve parça boyutu interaksyonu, istatistiki açıdan önemli bulunmuştur. En yüksek kül içeriği, 6 mm parça boyutunun % 12 nem içeriğine sahip peletlerde % 5,40 olarak belirlenirken en düşük kül içeriği de 2 mm parça boyutunun % 20 nem içeriğine sahip peletlerde % 3,27 olarak belirlenmiştir. Belirlenen kül içeriklerinin çizelge 5 deki pelet standart değerleri içerisinde yer aldığı görülmüştür.

## Nem Alma Direnci (%)

Pamuk sapından elde edilen peletlerin nem alma direnci, ortalama % 14,2 olarak belirlenmiştir. Nem alma direnci, peletin nemli ortamlardaki muhafaza şartlarında ne kadar ortamdaki nem alabileceğini gösterir ve az nem alması beklenir. Materyal nem içeriği, parça boyutu ve bunların interaksyonlarının verileri, Çizelge 1 ve 3 de verilmiştir. Düşük materyal nemi ve buna bağlı olarak oluşan düşük pelet nem içeriğinin peletlerin nem alma direncini de düşürdüğü görülmüştür. En düşük nem

**Çizelge 1:** Pamuk sapından elde edilen peletlerde materyal nemi ve parçacık boyutu verileri.

Materyal Nemi (%) (B)	Isıl Değer (kcal/kg)	Pelet Nemi (%)	Pelet Kül İçeriği (%)	Nem Alma Direnci (%)
12	4337 a	7,93 c	4,18 a	13,5 c
16	4320 b	8,37 b	3,94 b	14,1 b
20	4314 b	9,06 a	3,72 c	14,9 a
<b>Parça Boyutu (A)</b>				
2 mm	4288 b	9,46 a	3,84 b	14,8 a
4 mm	4331 a	8,74 b	3,90 b	14,2 a
6 mm	4339 a	8,24 c	4,33 a	13,4 b
8 mm	4338 a	7,37 d	3,70 c	14,2 a
<b>ORTALAMA</b>	<b>4324</b>	<b>8,45</b>	<b>3,95</b>	<b>14,2</b>
DK	0,32	2,84	2,79	4,64
Önem Derecesi	A ** B **	A ** B **	A ** B **	A ** B **

\* Aynı sütun içerisinde benzer harf ile gösterilen ortalamalar arasında Tukey testine göre  $P \leq 0,05$  seviyesinde istatistiksel olarak önemli farklılık yoktur.

\*\*  $P \leq 0,01$  seviyesinde istatistiksel olarak önemlidir.

Öd: Önemli değil

alma direnci olan % 13,5 değeri, materyal nem içeriği % 12 olan peletlerde belirlenmiştir. Ancak genel olarak incelendiğinde, örnekler arasında istatistiki yönden farklılık önemli olsa da (0,01), rakamsal olarak çok az fark görülmüştür. Materyal parçacık boyutları 2, 4 ve 8 mm olan pelet örneklerinin nem alma dirençleri arasında bir farklılık olmadığı görülmüştür. (Çizelge:3).

### Hammaddenin Yığın Yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)

Tarımsal artıklar genel olarak kaba materyaller olduğu için taşınmaları ve depolanmaları büyük bir problemdir. Taşınması ve muhafazası için yoğunluklarının azaltılması gerekmektedir. Bunlar pelet hale getirilmeleri için öncelikle belli bir büyüklükte parçacık boyutunda öğütülmektedirler. Burada da pamuk sapları, hasattan sonra tarladan toplanarak sıkıştırılmış ve yoğunlukları bir miktar azaltılmıştır. Pelet olması için ise, 2, 4, 6 ve 8 mm lik eleklerden geçecek şekilde öğütülmüş ve yoğunlukları daha da küçültülmüştür. Peletmeden önce hazırlanan hammaddenin yoğunlukları ölçülmüş ve Çizelge 2 ve 4 de verilmiştir. Pamuk sapı pelet yapılmadan önce hammadde olarak ölçülen yoğunluğu ortalama 154 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Parçacık boyutu yönüyle incelendiğinde ise, 2mm parça boyutundan en yüksek değer (201 kg/m<sup>3</sup>) elde edilmiştir. Bunu sırasıyla 4 mm, 6 ve 8 mm parça boyutları, 168, 132 ve 115 kg/m<sup>3</sup> takip etmiştir.

### Pelet Yığın Yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>)

Pamuk sapından elde edilen peletlerin ortalama yığın yoğunluğu, 468 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Materyal nem içeriklerine ve parçacık boyutlarına göre elde edilen peletlerin yığın yoğunluk değerleri de Çizelge 2 ve 4 de verilmiştir. Çizelgeler incelendiğinde, parça boyutu ve materyal nem miktarları ile bunların interaksiyonları arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmiştir. Materyal nem oranı % 12 olan peletlerde, 513 kg/m<sup>3</sup> ile en yüksek yığın yoğunluğu elde edilirken, bunu sırasıyla % 16 ve 20 nem içeriğindeki peletler, 479 ve 410 kg/m<sup>3</sup> olarak takip etmiştir. Materyal parçacık boyutları arasında da 2 mm parçacık boyutundan üretilen peletlerin 455 kg/m<sup>3</sup> değeriyle en düşük yığın yoğunluğunun sahip oldukları belirlenmiştir. Bunu 4 ve 6 mm parçacık boyutlu peletler aynı değerde, 472 kg/m<sup>3</sup> ile gelmiş ve 8 mm parçacık boyutundan üretilen peletlerinde 474 kg/m<sup>3</sup> ile en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen bu değerlerin hepsinin TS EN ISO 17225-6 pelet standart değerlerinin altında yer aldığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak, peletlemede kullanılan makinanın ayarlarından kaynaklanabileceği söylenebilir.

### Pelet Mekanik Dayanıklılık Direnci (Tumbler) (%)

Mekanik dayanıklılık direnci, peletin nakliyesi, depolanması ve muhafazası için önemli bir fiziksel özelliktir. Pamuk sapından elde edilen peletlerin

mekanik dayanıklılık dirençleri Çizelge 2 ve 4 de verilmiştir. Çizelge 2 de görüldüğü gibi, gerek hammadde nem oranı ve gerekse parçacık boyutlarının peletlerin mekanik dayanıklılığı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmiştir. Materyal nem oranı yükseldikçe, mekanik dayanıklılık direnci de yükselmiştir. En yüksek mekanik dayanıklılık değeri % 20 materyal neminden elde edilen peletlerde % 97,9 ile elde edilirken bunu sırasıyla % 16 ve 12 materyal nem içeriğinden elde edilen peletler, % 97,7 ve 97,3 olarak takip etmiştir. Parçacık boyutu olarak incelendiğinde de 2 mm den 6 mm parça boyutuna kadar artış görülmüş, 8 mm parça boyutunda tekrar düşüş görülmüştür. En yüksek değer, 6 mm de % 98 ile elde edilirken bunu sırasıyla 4 mm (% 97,7), 8 mm (% 97,6) ve 2 mm (%97,2) takip etmiştir. Çizelge 4 deki interaksiyon verileri incelendiğinde ise istatistik açıdan 0,01 seviyesinde önemli farklılık olduğu görülmektedir. Çizelgede görüldüğü gibi pelet mekanik dayanıklılık direnci, 8 mm parçacık boyutunda ve % 20 materyal nem içeriğinden elde edilen peletlerde, % 98,9 ile ilk sırada yer almıştır. Bunu 6 mm parça boyutunun % 20 nem ve 4 mm parça boyutunun % 16 nem içeriklerinden elde edilen peletler, % 98,6 ile takip ederek aynı grupta yer almışlardır. Elde edilen bu sonuçların çizelge 5 te verilen TS EN ISO 17225-6 pelet standart değerleri içinde yer aldığı ve bazı peletlerin A sınıfı, bazılarının da B sınıfı yakıt değerleri için uygun olduğu görülmüştür.

### Kırılma Direnci (Shatter) (%)

Pelet kırılma direnci de mekanik dayanıklılık direnci gibi peletin nakliyesi, depolanması ve muhafazası için önemli bir fiziksel özelliktir. Pamuk sapından elde edilen peletlerin kırılma dirençleri Çizelge 2 ve 4 de verilmiştir. Çizelge 2'de görüldüğü gibi, kırılma direncinde hammadde nem içeriğinin istatistiksel olarak önemsiz bulunurken, materyal parçacık boyutları 0,01 seviyesinde önemli bulunmuştur. Çizelge 4 incelendiğinde ise parçacık boyutu ve nem içeriği interaksiyonlarının kırılma direnci üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak önemsiz olduğu görülmektedir.

Pelet üretiminde peletlenecek hammaddenin parçacık boyutu önemli bir özelliktir. Çok küçük veya çok büyük parçacıklar, pelet kalitesini ve pelet üretiminde enerji tüketimini etkileyebilir. Pelet yakıtının çok popüler olmasının nedenlerinden birisi de nem içeriğinin % 10'un altında olmasıdır. Bu, peletlerin çok verimli bir şekilde yanmasını ve yanma sırasında neredeyse hiç duman üretmemesini sağlar. Pelet üretimi yüksek sıcaklıkta gerçekleşen bir işlemdir. Uygun nem içeriğine sahip materyalle en iyi

kalitede pelet elde edilir, enerji tüketimi azalır ve peletleme tesislerindeki arızalar en aza iner (Anonim, 2017). Pamuk sapının ısı değeri yönüyle incelendiğinde, oldukça yüksek değerde olduğu görülmüştür. Raju ve Raju (2019) tarafından yapılan pamuk sapı ile ilgili bir çalışmada, pamuk sapının ısı değerinin 15200 kJ/kg (3637 kcal/kg) olarak belirlendiği ve pamuk sapı kalıntılarının odunsu biyokütleyle alternatif olarak düşünülebileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada ise pamuk sapının ısı değeri 4324 kcal/kg olarak belirlenmiş ve daha yüksek bir değer elde edilmiştir. Jagtap ve Kalbande (2023), yaptıkları bir çalışmada, düz kalıplı peletleme makinesi kullanılarak üretilen yakıt peletlerinin özelliklerine nem içeriği ve partikül boyutunun etkisi araştırılmıştır. Deneme materyali olarak soya ve pamuk sapını kullanan araştırmacılar, farklı nem içeriği seviyeleri (% 20 ila %30 arasında değişen) ve parçacık boyutlarını (4 ila 8 mm arasında değişen) kullanmışlardır. Pelet dayanıklılık direnci, kütle yoğunluğu, suya dayanıklılık ve enerji tüketimi de dahil olmak üzere pelet özellikleri değerlendirmişlerdir. Çalışmada hem nem içeriğinin hem de parçacık boyutunun yakıt peletlerinin özelliklerini ve enerji tüketimini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiş ve standart özelliklere sahip yakıt peletleri üretmek için optimum nem içeriğinin % 25 ve parçacık boyutunun 6 mm olduğunu belirlemişlerdir. Bu çalışmada ise pelet yığın yoğunluğu standartların altında olmasına rağmen, mekanik dayanıklılık direnci, standart değerler içerisinde bulunmuştur. Materyal nem içeriğinin % 12-16 aralığında olmasıyla yüksek pelet yığın yoğunluğunda ürünler elde edilirken, parça boyutunun 2-8 mm aralığında değişmesiyle yığın yoğunluğu verileri etkilenmemişlerdir. Mekanik dayanıklılık direncinde materyal nem içeriğinin % 12-20 olduğu durumlarda dayanıklı peletler elde edilirken parça boyutları yönünden de 4-6 mm olması ile standartlara uygun ürünler üretilmiştir. Yılmaz ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada pamuk ve susam sapsarı pelet hammaddesi olarak kullanılmış. Elde edilen peletlerin üretim verimliliğini ve fiziksel özelliklerini karşılaştırmak amacıyla üretim kapasitesi, özgül enerji tüketimi, yığın yoğunluğu, parçacık yoğunluğu, dayanıklılık, basma direnci, özgül basma direnci ve çekme dayanımı testleri uygulanmıştır. İncelenen özelliklerden pelet dayanıklılığı, kütle yoğunluğu, partikül yoğunluğu ve çekme mukavemeti pamuk sapı peletleri için sırasıyla % 89–98, 430–695 kg/m<sup>3</sup>, 921–1367 kg/m<sup>3</sup>, ve 2,83–7,28 MPa, aralığında bulunmuştur. Pamuk sapı ve susam sapı için ideal peletleme nem değerlerinin sırasıyla % 10 ve % 15 olduğu sonucuna varılmıştır (Yılmaz vd., 2020).

**Çizelge 2:** Pamuk sapından elde edilen peletlerde materyal nemi ve parçacık boyutu verileri

Materyal Nem İçeriği (%) (B)	Hammadde Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Pelet Yığın Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Mekanik Dayanıklılık Direnci (%)	Kırılma Direnci (%)
12	151 b	516 a	97,3 c	99,8
16	152 b	479 b	97,7 b	99,8
20	159 a	410 c	97,9 a	99,8
<b>Parça</b>				
2 mm	201 a	455 b	97,2 c	99,8 a
4 mm	168 b	472 a	97,7 b	99,8 a
6 mm	132 c	472 a	98,0 a	99,9 a
8 mm	115 d	474 a	97,6 b	99,7 b
<b>ORTALAMA</b>	<b>154</b>	<b>468</b>	<b>97,6</b>	<b>99,8</b>
DK	2,84	0,79	0,21	0,08
Önem derecesi	A ** B **	A ** B **	A ** B **	A ** B Öd

\* Aynı sütun içerisinde benzer harf ile gösterilen ortalamalar arasında Tukey testine göre  $P \leq 0,05$  seviyesinde istatistiksel olarak önemli farklılık yoktur.

\*\*  $P \leq 0,01$  seviyesinde istatistiksel olarak önemlidir.

Öd: Önemli değil

**Çizelge 3:** Pamuk sapından elde edilen peletlerde incelenen veriler, parça boyutu x materyal nemi interaksyonu

Parça Boyutu (A)	Materyalin Nem İçeriği (%) (B)	Isıl Değer (kcal/kg)	Nem (%)	Kül (%)	Nem Alma Direnci (%)
2 mm	12	4250 f	8,0 b	3,80 de	13,67 df
	16	4290 e	9,67 a	4,47 b	15,00 ac
	20	4324 cd	9,70 a	3,27 g	15,67 ab
4 mm	12	4313 ce	8,47 c	3,90 cd	13,67 df
	16	4348 b	7,87 d	3,80 de	13,00 ef
	20	4331 bc	9,90 a	4,00 c	16,00 a
6 mm	12	4391 a	7,50 d	5,40 a	12,67 f
	16	4318 cd	8,47 c	3,80 de	13,67 df
	20	4307 de	8,77 bc	3,80 de	14,00 ce
8 mm	12	4395 a	6,77 e	3,60 f	14,00 ce
	16	4324 cd	7,47 d	3,70 ef	14,67 bd
	20	4294 e	7,87 d	3,80 de	14,00 ce
DK		0,32	2,84	2,79	4,64
<b>Önem Derecesi (AxB)</b>		**	**	**	**

\* Aynı sütun içerisinde benzer harf ile gösterilen ortalamalar arasında Tukey testine göre  $P \leq 0,05$  seviyesinde istatistiksel olarak önemli farklılık yoktur.

\*\*  $P \leq 0,01$  seviyesinde istatistiksel olarak önemlidir.

Doğan ve Özbey (2017) tarafından mısır ve buğday sapı artıklarından pelet üretimi konusunda bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada 3 farklı neme sahip (% 12, 16 ve 20) buğday ve mısır sapı numuneleri peletlenmiş ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, dayanıklılık direnci buğday sapı peletleri için % 97,5 ile %91,4 arasında, mısır sapı

peletleri için de % 96,9 ile %85,6 arasında değiştiği belirlenmiştir. Her iki materyalde de nem içeriği arttığında dayanıklılık direnci azalmıştır. Pelet yığın yoğunluğu değerlerinin buğday sapı peleti için 459-624 kg/m<sup>3</sup> arasında, mısır sapı peleti için de 500-694 kg/m<sup>3</sup> arasında değiştiği belirtilmiştir. Yığın yoğunluğunda da her iki materyal için nem içeriği

**Çizelge 4:** Pamuk sapından elde edilen peletlerde incelenen veriler, parça boyutu x materyal nemi interaksyonu

Parça Boyutu (A)	Materyalin Nem İçeriği (%) (B)	Hammadde Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Pelet Yığın Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Mekanik Dayanıklılık Direnci (%)	Kırılma Direnci (%)
2 mm	12	205 a	528 a	97,5 cd	99,8
	16	196 b	445 f	96,7 e	99,7
	20	200 ab	293 j	97,5 cd	99,8
4 mm	12	161 d	508 c	98,0 b	99,8
	16	168 cd	494 d	98,6 a	99,7
	20	174 c	414 h	96,7 e	99,8
6 mm	12	132 e	518 b	97,3 d	99,9
	16	124 f	496 d	98,0 b	99,8
	20	140 e	404 ı	98,7 a	99,8
8 mm	12	104 g	511 c	96,3 f	99,7
	16	119 f	483 e	97,7 bc	99,7
	20	121 f	428 g	98,9 a	99,6
DK		2,84	0,79	0,21	0,08
Önem der.(AxB)		**	**	**	Öd

\* Aynı sütun içerisinde benzer harf ile gösterilen ortalamalar arasında Tukey testine göre  $P \leq 0,05$  seviyesinde istatistiksel olarak önemli farklılık yoktur.

\*\*  $P \leq 0,01$  seviyesinde istatistiksel olarak önemlidir.

Öd: Önemli değil

**Çizelge 5.** TS EN ISO 17225-6 / (Eylül 2021). Katı biyoyakıtlar - Yakıt özellikleri ve sınıfları - Bölüm 6: Sınıflandırılmış ahşap olmayan peletler

Özellik sınıfı	Birim	A	B
		1- Ot esaslı biyoküteller 2- Meyve esaslı biyoküteller 3- Su ürünleri esaslı biyoküteller 4- Harmanlar ve karışımlar	1- Ot esaslı biyoküteller 2- Meyve esaslı biyoküteller 3- Su ürünleri esaslı biyoküteller 4- Harmanlar ve karışımlar
Çap (D) b ve Boy (L) c, ISO 17829	mm	D06 ila D25, $D \pm 1$ ; $3,15 < L \leq 40$ (D06 ila D10) $3,15 < L \leq 50$ (D12 ila D25)	D06 ila D25, $D \pm 1$ ; $3,15 < L \leq 40$ (D06 ila D10) $3,15 < L \leq 50$ (D12 ila D25)
Rutubet (M), ISO 18134-1, ISO 18134-2	%	$M12 \leq 12$	$M15 \leq 15$ M10
Kül (A) d, ISO	%	$A6.0 \leq 6$	$A10 \leq 10$
Mekanik dayanım (DU), ISO 17831-1	%	$DU97.5 \geq 97,5$	$DU96.0 \geq 96,0$
Net ısıl değer (Q)	MJ/kg veya kcal/kg	$Q14.5 \geq 14,5$ veya 3469 dan yüksek	$Q14.5 \geq 14,5$ veya 3469 dan yüksek
Yığın yoğunluğu (BD)	kg/m <sup>3</sup>	$BD600 \geq 600$	$BD550 \geq 550$

artıkça yığın yoğunluğunun azaldığı ifade edilmiştir. Çalışma sonunda kaliteli ve AB standartlarına uygun peletler elde edildiği belirtilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre tarla

bitkiler artıklarından biri olan pamuk sapı artıkları, katı yakıt pelet hammaddesi olarak kullanılabilir özelliktedir. Elde edilen peletlerde yapılan analizler sonucunda, ısıl değer, pelet nemi ve kül içerikleri, TS EN ISO 17225-6 pelet standart değerleri (Çizelge 5)

içerisinde yer aldığı görülmüştür.

#### 4. SONUÇ

Pelet hammaddesi olarak kullanılan orman artıkları ve orman sanayi artıkları toz, talaş vs. ürünlerin kullanım alanı sadece pelet sektörü değildir. Sunta, MDF, laminat, parke vs. gibi birçok sektörde orman sanayi artıkları ve orman ürünlerini kullanılmaktadır. Dolayısıyla çoğu zaman bu hammaddeleri de ithal edilmek zorunda kalınır. Bu çalışmada, pelet üretiminde ithalata gerek duymadan ve yerli kaynakların değerlendirilebileceği pelet hammaddesi olabilecek tarımsal artıklardan pamuk sapının pelet özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanım alanı oldukça fazla olan orman artığı ürünler, talaşlar, ağaç tozları, ağaçların kapak tahtaları vs. fiyatlarında da önemli artışlar olmakta, bu da pelet maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Pamuk sapından üretilen peletlerin, TS EN ISO 17225-6 standartlarını taşıdığı görülmüştür. Orman ürünleri yerine bu tarımsal artıklardan pamuk sapının kullanılmasıyla hem yerli kaynaklar değerlendirilmiş olacak, hem tarımsal artıklardan enerji elde edilerek maliyetler azalacak, hem de rastgele yakılan ve çevre kirliliğine neden olan pamuk sapı, çiftçiler için yeni bir gelir kaynağı olacaktır. Ayrıca peletleme tesisleri tarımsal üretim sahalarına kurularak kırsal kesimde de yeni bir istihdam alanı oluşacaktır. İç pazarda ve ihracatta kullanımı giderek yaygınlaşan pelet yakıt, fosil yakıtlara alternatif olarak tercih edilmektedir. Ülkemizin sahip olduğu ormanlık alanlar ve tarım ürünleri artığı, pelet yakıt üretiminde kullanılacak ham madde kaynakları olarak değerlendirilebilir. Bu da Türkiye'nin sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik ulusal hedeflerine ulaşması için önemli bir faktördür. Dolayısıyla pamuk sapı, yakacak pelet yakıt için hammadde kaynağı olabilecek tarımsal artıklar olarak değerlendirilebilir. Özellikle ısıl değerinin yüksek ve kül içeriğinin de düşük olması, pelet sektörü için hammadde kaynağı olabilecek potansiyelde alternatif kaynak olarak düşünülebilir.

Bu çalışma sonucunda;

- Tarla bitkilerinden pamuk sapının, ısıl değer, nem ve kül içerikleri yönüyle yalnız başına katı yakıt pelet hammaddesi olarak kullanılabilirliği,
- Pamuk sapı peletlenmesi için parça boyutlarının 4 ile 6 mm aralığında, materyal nem içeriğinin de % 12 ile 16 aralığında olması gerektiği,
- Standartlara uygun daha kaliteli pelet elde edilebilmesi için pamuk sapından elde edilen peletlerin fiziksel özelliklerini iyileştirici veya bağlayıcı materyallerle karışım yapılarak sonraki

çalışmaların buna yönelik yapılması gerektiği görülmüştür.

#### Teşekkür ve Bilgilendirme

Bu çalışma, Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsünde yürütülen ve TAGEM tarafından desteklenen “*Bazı Tarım Ürünleri Artıklarının Peletlenmesinde Nem Oranı ve Parçacık Boyutlarının Optimizasyonu*” isimli ve “TAGEM/TBAD/B/19/A7/P4/1332” nolu projeden üretilmiştir.

#### Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

#### KAYNAKÇA

- Acar M., (2021). Yenilenebilir enerji kaynağı: Biyoyakıtlar. *Türk Tarım Orman Dergisi*, Ocak-Şubat, 2021.  
<http://www.turktarim.gov.tr/Haber/570/yenilenebilir-enerji-kaynagi-biyoyakitlar>.
- Anonim, (2017). The Beginners Guide To Pellet Production.  
[http://www.weedcenter.org/mrwc/docs/The\\_Beginners\\_Guide\\_To\\_Making\\_Pellets.pdf](http://www.weedcenter.org/mrwc/docs/The_Beginners_Guide_To_Making_Pellets.pdf).  
Erişim: 11,12,2017.
- Anonim, (2023). <https://www.yenisafak.com/pelet-nedir-avantajlari-ve-kullanim-alanlari-h-3593063>.  
Erişim: 10.10.21023.
- Demirel, B., Gürdil, G.A.K. (2018). Fındık zurufu atığından yakıt briketi elde edilmesi ve briketeye ait bazı özelliklerin belirlenmesi. *Anadolu Tarım Bilim. Derg. / Anadolu J Agr Sci* 33 (2018) 24-29.
- Doğan, B., Özbey, M. (2017). *Mısır ve buğday tarımsal artıklarından pelet biyoyakıt üretimi*. On dokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek lisans tezi. Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı-Samsun, 2017.
- Jagtap, A. and Kalbande, S. (2023). Effect of Moisture Content and Particle Size on Characteristics of Fuel Pellets using Flat Die Type Pelleting Machine. *Int. J. Environ. Clim. Change*, vol. 13, no. 7, pp. 174-182.
- Kapluhan, E., (2014). Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu. *Marmara Coğrafya Dergisi* Sayı: 30, Temmuz - 2014, S.97-125.
- Karaca, C., Öztürk, H.H., Ekinci, K., (2016). Aydın ilinde bitkisel kökenli tarımsal biyokütle potansiyeli ve enerji üretimi amacıyla değerlendirilmesi, 2. Ulusal Biyoyakıtlar



- Sempozyumu, 47-56, 27-30 Eylül, 2016, Samsun.
- Kazimierz Zawiaślak, Paweł Sobczak, Artur Kraszkiewicz, Ignacy Niedziółka, Stanisław Parafiniuk, Izabela Kuna-Broniowska, Wojciech Tanaś, Wioletta Żukiewicz-Sobczak, Sławomir Obidziński. (2020). The use of lignocellulosic waste in the production of pellets for energy purposes, *Renewable Energy*, Volume 145, Pages 997-1003.
- Küsek, G., Güngör, C., Öztürk, H.H., Akdemir, Ş. (2015). Tarımsal Artıklardan Biyopelet Üretimi. *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, Cilt 29, Sayı 2, 137-145.
- Pamuk Bülteni, (2022). <https://www.tarimorman.gov.tr/BUGEM/Belgeler/B%C3%BCltenler/MAYIS%202022/Pamuk%20%20May%C4%B1s%20B%C3%BClteni.pdf>. Erişim: 21.02.2024. Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü Tarla ve Bahçe Bitkileri Daire Başkanlığı.
- Raju, N.P. and Raju, M. (2019). Experimental Study of Cotton Stalk Pellet Renewable Energy Potential from Agricultural Residue Woody Biomass as an Alternate Fuel for fossil fuels to Internal Combustion Engines. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 8 Issue 09, September-2019.
- Sungur, B., Topaloğlu, B., Özbey, M. (2018). Pelet Yakıtlı Yakma Sistemlerinin Isıl Performans ve Emisyon Açısından İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, cilt 59, sayı 693, s. 64-84, Ekim-Aralık 2018.
- The JMP® software version <XXX> developed by SAS Institute Inc, Cary, NC, from 1989 to 2023.
- TS EN ISO 17225-6 (2021). Solid biofuels-Fuel specifications and classes - Part 6: Graded non-woody pellets.
- Yılmaz, H., Topakci, M., Karayel, D. and M. Çanakci (2020). Comparison of the physical properties of cotton and sesame stalk pellets produced at different moisture contents and combustion of the finest pellets, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, doi: 10.1080/15567036.2020.1850931