

Türkiye’de İmal Edilen Odun Pelet Örneklerinin Kalite Özelliklerinin ve Standartlara Uygunluğunun Belirlenmesi

Determination of Quality Characteristics and Compliance with Standards of Wood Pellet Samples Produced in Turkey

Türkan Aktaş¹ 

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye.

* Corresponding author (Sorumlu Yazar): T. Aktaş, e-mail (e-posta): taktas@nku.edu.tr

Makale Bilgisi

Alınış tarihi : 11.10.2021
Düzeltilme tarihi : 04.03.2022
Kabul tarihi : 28.03.2022

Anahtar Kelimeler:

Odun Peleti
Baca Gazı
Pelet Kalite Standartları
Biyokütle

Atf için:

Aktaş, T., (2022). "Türkiye’de İmal Edilen Odun Pelet Örneklerinin Kalite Özelliklerinin ve Standartlara Uygunluğunun Belirlenmesi", *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 8(1): 25-40.

ÖZET

Bu çalışmada, ülkemizde yakıt olarak imalatı ve satışı yapılan odun peletlerinin kalite özellikleri belirlenmiş ve katı biyo-yakıtların yakıt özelliklerine yönelik farklı standartlara (DIN51731, DIN Plus, ÖNORM 7135, ISO 17225-2) uygunluğu araştırılmıştır. Ayrıca, bu peletler için baca gazı analizleri de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen emisyon sonuçları, Avrupa Birliği 2015/1185 ve 2015/1189 yönetmelikleri, TS EN 303-5 standardı, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY) ve "Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği" (IKHKKY) tarafından belirlenen emisyon sınırları ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, Türkiye’de 5 farklı şehirden odun peleti imalatı ve satışı yapan 10 farklı firmadan örnekler toplanmış ve alınan örneklerin standartlarda limit değerleri belirtilen özelliklerden olan uzunluk, çap, yoğunluk, mekanik dayanıklılık, nem içeriği, kül içeriği, ısı değeri ve baca gazı emisyon değerleri saptanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre, pelet örneklerinde uzunluk değeri 15.69-30.82 mm, çap değeri 6.06-10.39 mm, pelet yoğunluk değeri 944.91-1148.23 kg/m³, yığın yoğunluk değeri 482.8-641.8 kg/m³, mekanik dayanıklılık değeri %95.11-99.22, nem içerikleri %4.32-5.72, kül içerikleri %1.03-2.16, ısı değeri 18.08-18.49 MJ/kg arasında saptanmıştır. Baca gazı emisyon değerlerinden O₂ içeriği %12.7-17.7, CO miktarı 1443-2127 ppm, NO_x miktarı ise 83.7-213.0 ppm arasında ölçülmüştür. Ülkemizde de geçerli olan ISO 17225-2 standardında belirtilen kalite özelliklerine ilişkin sınır değerler açısından da pelet örneklerinde uzunluk, nem içeriği, ısı değeri açısından örneklerin %100’ünün uygun; çap, yığın yoğunluğu açısından da örneklerin %80’inin standartlara uygun olduğu belirlenmiştir. Öte yandan kül içerikleri incelendiğinde, örnekler içinde ENplusA1 sınıfına uygun pelet örneği olmadığı, %40’ının ENplusA2 sınıfına ve %80’inin ise ENplusB sınıfına girdiği, %20’sinin standart dışı olduğu saptanmıştır. Pelet örneklerinin CO emisyon değerleri AB yönetmeliklerinde belirlenen emisyon sınır değerini aşmıştır dolayısıyla AB Ekodesign-direktifinde belirtilen hiçbir ısıtma sisteminde bu çalışma kapsamında incelenen örneklerin uygun olmadığı belirlenmiştir. Aynı şekilde IKHKKY ve SKHKKY’de belirlenen emisyon limitleri incelendiğinde de bu yönetmeliklerde belirtilen yakma sistemlerinde pelet örneklerinin CO emisyonu açısından uygun olmadığı belirlenmiştir. TS EN 303-5 standardında belirtilen CO emisyon değerlerine göre incelediğimiz tüm pelet örneklerinin sadece "Sınıf 3"e 50 kW ısı gücü değerine kadar tüm ısıtma sistemlerinde kullanılabileceği, peletlerin %80’inin 50kW-150 kW ısı gücü sahip sistemlerde kullanılabileceği fakat daha yüksek ısı gücü sahip sistemler için hiçbirinin kullanımının uygun olmadığı saptanmıştır.

Article Info

Received date : 11.10.2021
Revised date : 04.03.2022
Accepted date : 28.03.2022

Keywords:

Wood Pellet
Flue Gas
Pellet Quality Standards
Biomass

How to Cite:

Aktaş, T., (2022). "Determination of Quality Characteristics and Compliance with Standards of Wood Pellet Samples Produced in Turkey", *Journal of Agricultural Machinery Science*, 8(1): 25-40.

ABSTRACT

In this research, the quality properties of wood pellets produced and sold as fuel in our country were determined and the compliance of solid biofuels with different standards (DIN51731, DIN Plus, ÖNORM 7135, ISO 17225-2) related to fuel properties investigated. In addition, flue gas analyzes were carried out for these samples. The emission results obtained were compared with the emission limits determined by the European Union regulations of 2015/1185 and 2015/1189, TS EN 303-5 standard, regulations on "Control of Industrial Air Pollution" (SKHKKY) and "Regulation on Control of Air Pollution Resulting from Heating" (IKHKKY)". For this purpose, samples were collected from 10 different companies that manufacture and sell wood pellets from 5 different cities in Turkey, and the length (mm), diameter (mm), density (kg/m³), mechanical strength (%), moisture content (%), ash content (%), calorific value (MJ/kg) and flue gas emission values were determined. According to the measurement results, It was determined that the length value is between 15.69-30.82 mm, the diameter value is between 6.06-10.39 mm, the density value is between 0.51-1.15 kg/m³, the mechanical strength value is 95.11-99.22%, moisture contents between 4.32-5.72%, ash contents between 1.03-2.03%, and heating values between 18.08-18.49 MJ/kg. Among the flue gas emission values, the O₂ content was measured between 12.7%-71.7%, the amount of CO was measured between 1443-2127 ppm, and the amount of NO_x was measured between 83.7-213 ppm. In terms of the limit values for the quality characteristics specified in the ISO 17225-2 standard, which is also valid in our country, 100% of the samples are suitable in terms of length, moisture content and heating value; In terms of diameter and bulk density, 80% of the samples were determined to comply with the standards. On the other hand, when the ash content results were examined, it was determined that the samples were not suitable for ENplusA1 class, 40% of the samples were in ENplusA2 class and 80% were in ENplusB class, 20% of the samples were non-standard. The CO emission values in the flue gas samples resulting from the burning of the pellet samples exceeded the emission limit value determined in the EU regulations, so it was determined that the pellet samples examined within the scope of this study were not suitable for any heating system specified in the EU Ecodesign-directive. Likewise, when the emission limits determined in IKHKKY and SKHKKY are examined, it has been determined that the pellet samples are not suitable in terms of CO emission in the combustion systems specified in these regulations. According to the CO emission values specified in the TS EN 303-5 standard, all the pellet samples we examined can only be used in all heating systems up to "Class 3" up to 50 kW thermal power, 80% of the pellets can be used in systems with 50kW-150 kW thermal power but it has been determined that none of them is suitable for systems with higher thermal power.

1. GİRİŞ

Ülkemiz açısından büyük bir potansiyele sahip olan biyokütle kaynaklarının kullanımının gerek ekonomik ve gerekse çevresel açıdan pekçok önemli avantajları olması sebebiyle, son yıllarda bu konuya olan ilgi artmış ve çalışmalar büyük hız kazanmıştır. Biyokütle kaynakları arasında orman biyokütle varlığı önemli bir yer tutmaktadır. Ülkemiz 2020 yılı itibariyle 22.933.000 ha orman ve ağaçlık araziye sahiptir (Karaca, 2021). Türkiye’de sürdürülebilir, ucuz ve temiz enerji eldesi için önem taşıyan orman biyokütle varlığından kaynaklanan ürün potansiyellerine yönelik 2018 verilerine göre; toplam kereste miktarı 8.205.000 m³ ve toplam atık kereste miktarı 2.461.500 ton; toplam endüstriyel odun üretimi 6.678.047 ton ve endüstriyel odun atık miktarı 3.339.023 ton; toplam ahşap bazlı panel (sunta, kontrplak ve mdf) üretim miktarı 9.377.000 m³ ve toplam ahşap bazlı panel atık miktarı ise 982.000 ton olarak saptanmıştır (Gürel, 2020).

Biyokütle kaynakları geleneksel yöntemlerin kullanılmasıyla ısınma, pişirme vb. uygulamalarda yaygın olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan ticari ölçekte gerçekleştirilecek enerji uygulamaları için biyokütle kullanımında önemli sınırlayıcı faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler özellikle düşük kütle yoğunluğu ve besleme, taşıma ve nakliye için optimum olmayan biçimsel özelliklere sahip olmalarıdır. Biyokütlenin yoğunluğu hasat ve balyalama işlemlerinden sonra 112-160 kg/m³ aralığına yükselirken (Atchison ve Hettenhaus, 2004), parçalamadan sonra odun yoğunluğu yaklaşık 265 kg/m³'e yükselmektedir. Peletleme ve briketleme işlemleri ile biyokütle yığın yoğunluğu 4-7 kat artırılabilir ve böylece biyokütle ticari tip bir ürün haline gelmektedir (Tumuluru, 2016). Farklı peletleme sistemleri kullanılarak elde edilen odun peletleri yaygın olarak ısınma amacıyla veya sanayi amaçlı olarak fırın, kazan gibi yakma sistemlerinde yakılarak ya da gazlaştırma ve piroliz vb. termokimyasal dönüşüm yöntemleri ile gaz ve sıvı yakıtlara dönüştürülerek kullanılmaktadır (Ray vd. 2013, Tumuluru 2016).

Pelet yakıtları; talaş, odun yongası, ağaç kabuğu vb. gibi ağaç ürünleri ve mobilya imalatı sektörünün atıkları, artık tarımsal ürünler, tahıl sapları, fındık, badem, ceviz kabukları ve hatta atık kağıt gibi pekçok farklı materyal kullanılarak imal edilmektedir. Odun peleti üretiminde kullanılan temel hammadde ise beyaz odun (gövde odunu), kabuk ve tomruklama artıklarından sağlanmaktadır ve beyaz odun yongaları çok düşük kül oranı (%1 den az) içeren Premium cinsi üstün nitelikli pelet üretiminde kullanıldığı için tercih edilmektedir (Çelik, 2011). Odun peleti, odun artıklarının kurutulup öğütülerek talaş hâline getirildikten sonra yüksek basınçla sıkıştırılmasından elde edilen 6-10 mm çapındaki yakıt topakları olarak tanımlanmakta ve üretim teknolojisinin kolaylığı, çevre dostu olması vb. özellikleri ile bütün yenilenebilir enerji kaynakları içinde ön plana çıkmaktadır (Zengin vd., 2020). Bugün odun peleti için ana hammadde talaş olup odun yongası, ağaç kabuğu gibi malzemeler de bu hammaddeye eklenebilmektedir (Çelik, 2011).

Pelet yakıtların kimyasal ve mekanik özellikleri; iyi yanma, yüksek verim, düşük emisyon ve partikül salınımı ile kül ve cüruf atık miktarını etkileyen önemli faktörlerdir (Sungur vd., 2018). Bu faktörler dikkate alındığında üretilen ve kullanılacak peletlerin Çizelge 1’ de bazıları belirtilmiş olan ilgili standartlara uygun olması beklenmektedir. Avrupa ülkelerinde her ülkenin kullandığı farklı standartlar mevcuttur. Örneğin; SN 166000 (İsviçre), NS 3165 (Norveç), SS 187120 (İsveç), DIN 51731 (Almanya), ÖNORM 7135 (Avusturya) bunlardan bazılarıdır. Pelet yakıtlarının standartlarda da belirtilmiş olan kalite özelliklerinden olan nem içeriklerinin düşük, ısıl değerlerinin yüksek, kül içeriklerinin düşük ve yoğunluk değerlerinin yüksek olması beklenmektedir. Pelet boyutları da peletin

depodan yanma odasına kolaylıkla taşınmasında önemli rol oynayan özellikler arasındadır (Sungur vd., 2018).

Öte yandan ülkemizde imal edilmekte olan ve satışı yapılan odun peletleri için genelde üretici firma tarafından ambalaj üzerinde verilen etiket bilgileri incelendiğinde, kalite özellikleri ile ilgili verilmesi gereken bilgilerin bazılarının hiç verilmediği, eksik veya çok yanlış verilebildiği görülmüştür. Öyle ki özellikle ısı değer bilgileri dikkate alındığında, bu verilerin alt veya üst ısı değer olarak belirtilmeden ve çok yanlış birimlerle ifade edilerek verildiği etiket bilgilerine rastlanmıştır. Örneğin, etiket üzerinde 5200 kWh/kg olarak belirtilmiş olan yani 18720 MJ/kg değerine karşılık gelen ısı (kalorifik) değere dahi rastlanmıştır. Çizelge 1’de de görüldüğü gibi standart peletler için üst ısı değer 16.56-19.5 MJ/kg arasında değişmektedir.

Çizelge 1. Odun peleti standartları (Sungur vd. 2018, Gürdil vd. 2015)

Parametre	Birim	DIN 51731	DINPlus	ÖNORM 7135	ISO 17225-2		
					ENplusA1	ENplusA2	ENplusB
Çap	mm	4-12	-	4-10	6±1 ya da 8±1		
Uzunluk	mm	<50	<5xD	<5xD	3.15<L≤40 ¹		
Pelet yoğunluğu	(g/cm ³)	1.0-1.4	>1.12	>1.12	-		
Yığın yoğunluğu	kg/m ³	-	-	-	BD600 ≥ 600		
Nem içeriği	(w-%)	<12	<10	<10	≤10		
Kül içeriği	(w-%)	<1.5	<0.5	<0.5	≤0.7	≤1.2	≤2.0
Mekanik dayanıklılık	(w-%)	-	-	-	≥ 97.5	≥ 97.5	≥ 96.5
Üst ısı değeri	MJ/kg	17.5-19.5	>18	>18	≥16.56		

Peletlerin kullanıldığı soba, kazan vs. gibi sistemlerde yanma özelliklerinin ve kullanılan yakıtın çevresel etkilerinin saptanabilmesi için yanma sonucunda ortaya çıkan baca gazındaki gazların (CO, CO₂, O₂, NO_x, SO_x vb.) emisyon değerlerinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra yakma sistemlerinde bacalarda oluşabilecek yoğunlaşmayı engellemek için izin verilebilecek minimum gaz sıcaklığı da önemli olmakla beraber bu veriye ilişkin bir düzenleme mevcut değildir. Bununla birlikte baca gazı kanal ve borularının yüzey sıcaklıklarının 100 °C’yi geçmemesi istenmektedir (Sungur vd., 2018). Baca gazları emisyon sınır değerleri incelendiğinde, bu değerlerin kullanılan yakıt çeşidine (katı, sıvı, gaz vs.), kullanılan yakma sistemlerine, kullanım amaçlarına (ısıtma, sanayi vs.), ısı gücü değerlerine vs. bağlı olarak farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Baca gazlarına ilişkin izin verilen sınır değerler; Avrupa Birliği Ekodesign-direktifine göre belirlenmiş olan AB 2015/1185 ve 2015/1189 yönetmelikleri (soba, merkezi ısıtma sistemleri vs. gibi farklı yakma sistemleri için 2022 yılından itibaren dikkate alınacak olan sınır değerler) (Amann vd. 2018), Avrupa ülkelerinin bazılarında ve ülkemizde de yürürlükte olan EN 303-5 (TS EN 303-5, 2021) normu (Sungur vd. 2018), “Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY, 2014)” ve “Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (IKHKKY, 2009)”ne göre Çizelge 2’de verilmiştir.

Bu çalışmada, ülkemizde imal edilen ve yakıt olarak satışı yapılan odun pelet örneklerinin kalite özellikleri belirlenmiş ve saptanan bu özelliklerin katı biyoyakıtların yakıt özelliklerine yönelik farklı standartlara (Alman DIN normları, Avusturya Ö-normları ve ülkemizde de kullanılan Avrupa EN normları) uygunluğu araştırılmıştır. Ayrıca yanma sonucunda ortaya çıkan baca gazlarının emisyon

değerleri ve sıcaklıkları da belirlenerek Avrupa Birliği Ekodesign-direktifine göre belirlenmiş olan AB 2015/1185 ve 2015/1189 yönetmeliklerinde, TS EN 303-5 normunda (2021), "Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği"nde (2014) ve "Isınmadan Kaynaklanan Hava kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği"nde (2009) belirtilen emisyon sınır değerlerine göre hangi yakma sistemlerinde kullanımlarının uygun olabileceği değerlendirilmiştir.

Çizelge 2. Biyokütle ve odun kaynaklı katı yakıtların kullanımında baca gazı emisyon sınırları (IKHKKY 2009, SKHKKY 2014, Amann vd. 2018, Sungur vd. 2018)

<i>Avrupa Birliği Ekodesign-direktifi, AB 2015/1185 ve 2015/1189 yönetmeliklerine göre</i>						
Küçük ölçekli yakma sisteminin tipi	Yakıt	Çalışma	Isıl güç	O ₂ ref. değeri (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)
Açık yanma odalı tek soba	Biyokütle kaynaklı katı yakıt	Hepsi	≤50 kW	13	1746.43	63.78
Kapalı yanma odalı tek soba	Biyokütle kaynaklı katı yakıt	Hepsi	≤50 kW	13	1309.82	63.78
Tek mutfak sobası	Biyokütle kaynaklı katı yakıt	Hepsi	≤50 kW	13	1309.82	63.78
Kapalı yanma odalı tek soba	Odun peleti	Otomatik	≤50 kW	13	261.96	106.3
Merkezi ısıtma sistemi	Biyokütle kaynaklı katı yakıt	Manuel	≤500 kW	10	611.25	106.3
Merkezi ısıtma sistemi	Biyokütle kaynaklı katı yakıt	Otomatik	≤500 kW	10	436.61	106.3

TS EN 303-5 normuna göre

Kazanlar	Yakıt	Çalışma	Isıl güç	O ₂ ref. değeri (%)	CO (ppm)		
					Sınıf 3	Sınıf4	Sınıf5
Biyokütle kaynaklı katı yakıt	Manuel		≤50 kW	10	4365.75	1047.87	611.26
			50 kW<IG≤150 kW	10	2183.03	-	-
			150 kW<IG≤500 kW	10	1135.18	-	-
Biyolojik kaynaklı katı yakıt	Otomatik		≤50 kW	10	3435.59	1309.82	436.60
			50 kW<IG≤150 kW	10	2183.03	-	-
			150 kW<IG≤500kW	10	1135.18	-	-

IKHKKY'ya göre

Isıtma sistemleri	Yakıt	Çalışma	Isıl güç	O ₂ ref. değeri (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)
100 kW<IG≤500kW	13	400				
500 kW<IG≤1000 kW	13	240				

SKHKKY'ya göre

Kazanlar	Yakıt	Çalışma	Isıl güç	O ₂ ref. değeri (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)	SO _x (ppm)
15MW-50 MW	-	368	-	70			
50 MW ≤IG<100MW	6	-	195	70			
100MW≤IG<300MW	6	-	146	70			
IG≥300 MW	6	-	98	70			

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Örnek Hacminin Belirlenmesi ve Materyal Temini

Bu çalışmada ana materyal olarak; pelet imalatçıların daha yoğun oldukları bölgelerde (İç Anadolu Bölgesi, Ege Bölgesi, Marmara Bölgesi) yer alan 5 farklı şehirde (Ankara, İzmir, Bursa, Sakarya ve Tekirdağ) yakacak olarak odun peleti imalatı ve satışı yapan 10 farklı firmadan toplanan örnekler kullanılmıştır. Pelet imalatçıların dağılımına bakıldığında (Kutay, 2021) ele alınan bu bölgelerin yanı sıra Akdeniz ve Karadeniz Bölgelerinde de resmi pelet imalatçıların olduğu anlaşılmalı beraber bu firmalardan örnek temini mümkün olamamıştır.

Ülkemizde resmi olarak pelet imalatı yapan toplam 30 imalatçı olduğu bildirilmiştir (Kutay, 2021). İnternet üzerinden resmi ve resmi olmayan pelet imalatçıları da incelenmiş olup bunların markalı ve markasız olarak satış yapmakta olduğu ve toplam sayılarının ise 58 civarında olduğu anlaşılmıştır (inceleme 2022 Şubat ayı içerisinde yapılmıştır).

Araştırmada örnek hacmi (örneklem büyüklüğü) belirlenirken resmi ve resmi olmayan imalatçı sayıları göz önüne alınmıştır. Bu tür çalışmalarda örnek hacmi belirlenirken toplam işletme sayısının en az %3 (Yamane, 2006) veya %10'unun (Cochran, 1977) alınmasının yeterli olacağı ve örnek hacminin birim sayısının artmasıyla ana kitlenin daha iyi temsil edileceği de bildirilmiştir (Han ve Bakır, 2010). Resmi olan imalatçı sayısına bakıldığında araştırma kapsamında 3 imalatçının ürünü olan peletlerin araştırmaya dahil edilmesinin yeterli olduğu anlaşılmakla beraber örnek hacmi mümkün olduğunca büyük tutularak 10 olarak seçilmiştir.

Çeşitli firmalardan toplanan odun pelet örnekleri Ö harfiyle isimlendirilmiş ve numaralandırılmıştır (Ö1...Ö10 şeklinde).

2.2. Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi

Pelet kalite özelliklerinden çap, uzunluk, pelet partikül yoğunluğu ve yığın yoğunluğu ile ilgili ölçümler 10 tekerrürlü olarak yapılırken nem, kül, mekanik dayanıklılık ve ısı değer ölçümleri ise 3 tekerrürlü olarak gerçekleştirilerek elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır.

Pelet örneklerinin çap ve uzunluk değerleri 0.01 mm hassasiyete sahip dijital bir kumpas kullanılarak EN 16127 (2012) standardına uygun olarak ölçülmüştür. Pelet partikül yoğunluklarının belirlenmesi için EN 16127 standardında belirtildiği şekilde pelet örneklerinin çap, uzunluk değerleri ölçülmüş ve bu ölçüler kullanılarak hacimleri hesaplanmıştır. Herbir peletin kütlesi ölçülerek pelet kütlesinin pelet hacmine bölünmesi ile pelet yoğunluğu kg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Pelet örneklerinin yığın yoğunluğu EN 15103 (2009) standardına uygun olarak pelet örnekleri 5 litre hacme sahip silindirik kap içerisine silme olarak doldurulmuş ve 3 kez yaklaşık olarak 150 mm yükseklikten serbest olarak ahşap zemin üzerine bırakılmıştır. Daha sonra, kabın üst kısmındaki fazla pelet örnekleri kap dışına alınmıştır. Yığın yoğunluğu, pelet kütlesinin kap hacmine bölünmesi ile belirlenmiştir (kg/m^3).

Peletlerin mekanik dayanıklılıkları EN 15210-2 (2010) standardına göre belirlenmiştir. Öncelikle 500 ± 10 g pelet örneği test cihazına koyularak 10 dakika boyunca 50 ± 2 1/min devirde çalıştırılmıştır. 10 dakika sonunda peletler dışarı alınarak 3.15 mm çapa sahip elek ile elenmiştir. Mekaniksel dayanıklılık değeri test öncesinde ve sonrasında oluşan kütle kaybına (%) bağlı olarak hesaplanmıştır.

Pelet örneklerinin nem içerikleri EN 14774-2 (2009) standardında belirtilmiş olan etüvde (Drying Oven marka, DHG-9055A model) kurutma yöntemi uygulanarak ve aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Nem (y.b.)} = ((M_2 - M_3) / (M_2 - M_1)) \times 100 \quad (1)$$

Bu eşitlikte; M_1 kurutma kabının boş ağırlığı (g), M_2 kurutma öncesi kuru örnek kabı ve örnek ağırlığı toplamı (g), M_3 ise kurutma sonrası kuru örnek kabı ve örnek ağırlığının toplamıdır (g).

Pelet örneklerinin kül içerikleri EN 14775 (2009) standardında belirtilen yöntem ile kül fırını (Nüve marka, MF110 Model) ve örneklerin içine koyulduğu krozeler kullanılarak ve aşağıda verilmiş olan formül yardımıyla kül miktarının kuru örnek ağırlığına oranlanmasıyla % olarak belirlenmiştir.

$$\% \text{ Kül} = ((\text{Ağırlık}_{\text{kroze+kül}} - \text{Ağırlık}_{\text{kroze}}) / \text{Ağırlık}_{\text{kuru örnek}}) \times 100 \quad (2)$$

Örneklerin üst ısıl değerleri (HHV) ise EN 14918 (2009) standardına göre Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü laboratuvarında (Samsun) bulunan IKA marka C200 model kalorimetre cihazı ile ölçülmüştür.

2.3. Baca Gazı Emisyon Değerlerinin Belirlenmesi

Baca gazı sıcaklığı ve emisyon değerlerinin ölçümleri her bir örnek için birer dakika aralıklarla 3 okuma yapılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Baca gazı emisyon değerleri Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü laboratuvarında (Samsun) bulunan pelet sobası ve ECOM EN2 marka baca gazı analizörü kullanılarak ölçülmüştür. Peletler önce yakma sobasında yakılmış ve baca gazı sıcaklığının yanısıra oluşan baca gazı emisyon değerleri (O₂, CO₂, CO, NO, NO_x ve SO₂) analizör ile ölçülerek kaydedilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

3.1. Kalite Özelliklerine İlişkin Sonuçlar

Kalite özellikleri olarak 10 farklı pelet örneğinde ölçülmüş olan çap, uzunluk, partikül yoğunluğu, yığın yoğunluğu, nem içeriği, kül içeriği, ısıl değer ve mekanik dayanıklılık değerlerinin ortalamaları ve standart sapma verileri Çizelge 3'de verilmiştir. Çizelge 3'de görüldüğü gibi örneklerin ortalama uzunluk değerleri 15.69-30.82 mm, çap değerleri 6.06-10.39 mm, pelet yoğunlukları 944.91-1148.23 kg/m³, yığın yoğunlukları 482.8-641.8 kg/m³, nem içerikleri %4.32-5.72, kül içerikleri %1.03-2.16, mekanik dayanıklılık değerleri %95.11-99.22 ve ısıl değerleri 18.08-18.49 MJ/kg arasında değişmiştir. Farklı standartlarda belirtilmiş olan sınır değerlere göre bu peletlerin uygunluk durumları Çizelge 4'de özetlenmiştir. Tumuluru vd. (2010) Britanya Kolumbiyası'nda ihracat için üretilen ve farklı yükleme zamanlarında örneklenmiş olan odun peletlerinin kalite özelliklerinin Avrupa Standartlar Komitesi (CEN) ve Amerika Birleşik Devletleri Pelet Yakıt Enstitüsü tarafından belirtilmiş olan derecelendirmeye uygunluğu üzerine bir araştırma yapmışlardır. Bu araştırma sonucunda çap değerlerinin 6.4 ila 6.5 mm, uzunluk değerlerinin 14.0 ila 19.0 mm, yığın yoğunluğunun 728 ila 808 kg/m³, nem içeriğinin %3.5 ila %6.5, kül içeriğinin %0.26 ila %0.93, mekanik dayanıklılığın %97 ila %99 ve ısıl değerlerinin ise 17 ila 18 MJ/kg aralıklarında değiştiğini ve belirtilen derecelendirmeyi karşıladığını saptamışlardır. Bu çalışma kapsamında belirlenen kalite özelliklerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde, kül içeriklerine ilişkin sonuçların bizim çalışma sonuçlarımıza göre daha düşük saptandığı (kullanılan hammaddeye bağlı olarak) diğer sonuçların ise genel olarak paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Zengin vd. (2020) tarafından gerçekleştirilmiş olan orman artıklarının pelet olarak değerlendirilme imkânlarının araştırılmasına yönelik çalışmada 21 farklı varyasyonda üretilen peletler için nem değerleri %4.41-7.21, kül yüzdeleri %0.61-1.73, ısıl değerler ise 18.26-19.44 MJ/kg arasında belirlenmiş olup yine bizim araştırma sonuçlarımızla paralel sonuçlar elde edilmiş olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3'de verilmiş olan ortalama uzunluk değerleri incelendiğinde tüm pelet örneklerinin uzunluk özelliği açısından 4 standarda da (DIN51731, DINPlus, ÖNORM 7135 ve ISO17225-2) uygun olduğu anlaşılmaktadır (Çizelge 4).

Çap ortalama değerleri pelet standartlarına göre irdelendiğinde tüm pelet örneklerinin çap değerlerinin DIN51731 standardına uygun olduğu (4-12 mm), Ö1ve Ö7 örnekleri hariç diğer örneklerin ÖNORM 7135 standardına uygun oldukları ve ISO 17225-2'de belirtilmiş olan ENplus pelet sınıflarına girdikleri belirlenmiştir (Çizelge 4).

Pelet yoğunlukları incelendiğinde, Ö1 ve Ö7 örnekleri hariç diğer örneklerin DIN51731 normunda belirtilen sınırlar içinde kaldığı (1000-1400 kg/m³) fakat DINPlus'da ve ÖNORM 7135'de belirtilen sınırlara (>1120 kg/m³) sadece Ö4 ve Ö5 örneklerinin uyduğu saptanmıştır (Çizelge 4).

Pelet örneklerinin yığın yoğunlukları incelendiğinde bu özellik için sınır değerin sadece ISO 17225-2'de belirtilmiş olan her üç pelet sınıfı için de aynı olan sınır değere (≥ 600) Ö1 ve Ö7 peletleri hariç diğer pelet örneklerinin uygun olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4).

Pelet bilgi etiketlerinde yer alan önemli kalite özelliklerinden birisi olan ve yüksek ısı değeri için düşük olması istenen nem içeriklerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde (%4.32-5.72 arasında), bu araştırma kapsamında incelenmiş olan tüm örneklerin nem içeriklerinin 4 standarda da uygun olduğu görülmektedir (Çizelge 4).

En önemli pelet yakıt kalite özelliklerinden birisi olan kül içeriği değerleri incelendiğinde hiçbirinin DINPlus ve ÖNORM 7135 normlarına uygun olmadığı, 10 örnek içinde Ö1, Ö7 ve Ö9 numaralı 3 örneğin kül içerikleri hariç diğer örneklerin DIN51731 normuna uygun olduğu, ISO 17225-2'de belirtilmiş olan ENplus pelet sınıflarından ENplusA1 sınıfına hiç bir örneğin uygun olmadığı, ENplusA2 sınıfına 4 örneğin uygun olduğu (Ö2, Ö5, Ö6, Ö10) ve ENplusB sınıfına ise Ö1 ve Ö7 örnekleri hariç diğer 8 örneğin uygun olduğu saptanmıştır (Çizelge 4).

Mekanik dayanıklılıkla ilgili sınır değerler, incelenen standartlar içerisinde sadece ISO 17225-2'de verilmiştir. Elde edilen mekanik dayanıklılık sonuçları incelendiğinde 4 pelet örneği hariç (Ö5, Ö6, Ö9, Ö10) diğer örneklerin ENplusA1 ve ENplusA2 sınıflarına uygun olduğu, 2 örnek hariç (Ö5 ve Ö6) diğer örneklerin ise ENplusB sınıfına uygun olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4).

Üst ısı değeri sonuçları incelendiğinde tüm pelet örneklerinin ısı değeri 18 MJ/kg değerinden yüksek olduğu dolayısıyla bu değerlerle ilgili olarak 4 farklı standarda da uygun oldukları anlaşılmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 3. Pelet örneklerinin kalite özelliklerine ilişkin ortalama ve standart sapma değerleri

Örnek No	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Pelet yoğunluğu (kg/m ³)	Yığın yoğunluğu (kg/m ³)	Nem (y.b.)	Kül (%)	Mekanik dayanıklılık (%)	Isıl değer (MJ/kg)
Ö1	30.65 ^(2.06)	10.37 ^(0.23)	944.91 ^(28.01)	482.8 ^(5.02)	4.32 ^(0.18)	2.16 ^(0.04)	97.69 ^(0.48)	18.11 ^(0.02)
Ö2	23.82 ^(3.75)	6.42 ^(0.16)	1011.01 ^(85.66)	602.8 ^(3.96)	5.72 ^(0.26)	1.17 ^(0.02)	98.31 ^(0.03)	18.49 ^(0.02)
Ö3	25.01 ^(6.17)	6.06 ^(0.16)	1091.43 ^(68.45)	619.2 ^(2.2)	5.06 ^(0.49)	1.41 ^(0.03)	98.92 ^(0.28)	18.27 ^(0.04)
Ö4	23.93 ^(3.41)	6.12 ^(0.04)	1130.72 ^(34.59)	641.8 ^(2.39)	5.62 ^(0.07)	1.44 ^(0.06)	99.22 ^(0.16)	18.41 ^(0.08)
Ö5	20.34 ^(5.53)	8.28 ^(0.09)	1148.23 ^(36.54)	611.4 ^(2.61)	4.57 ^(0.19)	1.03 ^(0.04)	96.46 ^(0.49)	18.21 ^(0.01)
Ö6	15.69 ^(3.25)	6.37 ^(0.20)	1066.9 ^(83.82)	607.8 ^(2.86)	5.28 ^(0.10)	1.08 ^(0.02)	95.11 ^(0.15)	18.17 ^(0.02)
Ö7	30.82 ^(3.01)	10.39 ^(0.24)	957.98 ^(52.83)	507.8 ^(3.49)	4.32 ^(0.30)	2.03 ^(0.03)	98.43 ^(0.48)	18.08 ^(0.02)
Ö8	25.25 ^(3.93)	6.37 ^(0.23)	1004.71 ^(19.05)	631.6 ^(2.88)	5.36 ^(0.53)	1.29 ^(0.05)	99.05 ^(0.15)	18.29 ^(0.17)
Ö9	25.62 ^(3.17)	6.19 ^(0.16)	1015.9 ^(25.37)	608.8 ^(1.64)	5.32 ^(0.51)	1.67 ^(0.10)	96.87 ^(0.80)	18.41 ^(0.02)
Ö10	23.77 ^(5.23)	8.18 ^(0.12)	1017.54 ^(6.21)	637.4 ^(3.44)	4.94 ^(0.11)	1.11 ^(0.09)	96.72 ^(0.76)	18.18 ^(0.11)

Çizelge 4. Odun peleti örneklerinin kalite özellikleri açısından standartlara uygunluk durumları
(✓: Uygun, ✗: Uygun değil)

Kalite Özellikleri	Standartlar	Örnekler										
		Ö1	Ö2	Ö3	Ö4	Ö5	Ö6	Ö7	Ö8	Ö9	Ö10	
Çap (mm)	DIN 51731	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	DINPlus	Bu standartta çap özelliği için herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir.										
	ÖNORM 7135	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	
	ISO 17225-2	ENplusA1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		ENplusA2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
		ENplusB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Uzunluk (mm)	DIN 51731	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	DINPlus	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	ÖNORM 7135	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	ISO 17225-2	ENplusA1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		ENplusA2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
		ENplusB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Pelet yoğunluğu (g/cm ³)	DIN 51731	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	
	DINPlus	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	
	ÖNORM 7135	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	
	ISO 17225-2	ENplusA1	Bu standartta pelet yoğunluğu özelliği için herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir.									
		ENplusA2										
		ENplusB										
Yığın yoğunluğu (kg/m ³)	DIN 51731	Bu standartta yığın yoğunluğu özelliği için herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir.										
	DINPlus	Bu standartta yığın yoğunluğu özelliği için herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir.										
	ÖNORM 7135	Bu standartta yığın yoğunluğu özelliği için herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir.										
	ISO 17225-2	ENplusA1	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
		ENplusA2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		ENplusB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Nem içeriği (%)	DIN 51731	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	DINPlus	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	ÖNORM 7135	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	ISO 17225-2	ENplusA1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		ENplusA2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
		ENplusB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Kül içeriği (%)	DIN 51731	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	
	DINPlus	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
	ÖNORM 7135	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
	ISO 17225-2	ENplusA1	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
		ENplusA2	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✓	
		ENplusB	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	
Mekanik dayanıklılık (%)	DIN 51731	Bu standartta mekanik dayanıklılık özelliği için herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir.										
	DINPlus	Bu standartta mekanik dayanıklılık özelliği için herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir.										
	ÖNORM 7135	Bu standartta mekanik dayanıklılık özelliği için herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir.										
	ISO 17225-2	ENplusA1	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗
		ENplusA2	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	
		ENplusB	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	
Üst ısı değeri (MJ/kg)	DIN 51731	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	DINPlus	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	ÖNORM 7135	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	ISO 17225-2	ENplusA1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		ENplusA2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
		ENplusB	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

3.2. Baca Gazı Emisyon Değerlerine Yönelik Sonuçlar

Araştırma kapsamında incelenen pelet örnekleri için ortalama baca gazı emisyon (O₂, CO₂, CO, NO, NO_x ve SO₂) ve baca gazı sıcaklık sonuçları Çizelge 5' de verilmiştir. Yakma sonunda ortaya çıkan baca gazı içerisindeki CO emisyon değerleri incelendiğinde bu değerlerin 1443-2375 ppm arasında değiştiği ve pelet örneklerinin hepsinde Avrupa Birliği Ekodesign-direktifine göre belirlenmiş olan AB 2015/1185 ve 2015/1189 yönetmeliklerinde odun peletleri için belirtilen 261.96 ppm emisyon sınırının aşıldığı dolayısıyla bu direktifte verilen hiçbir ısıtma sisteminde bu çalışma kapsamında incelenen pelet örneklerinin kullanılmayacağı anlaşılmaktadır. Ülkemizde 15 kW-1000 kW arası ısı güce sahip katı

yakıt yakılan ısıtma sistemleri için düzenlenen "Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (IKHKKY, 2009)" ve 500 kW-300 MW ısı güce sahip katı yakıt yakılan sistemler için düzenlenmiş olan "Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY, 2014)"nde belirlenen emisyon limitleri incelendiğinde de bu yönetmeliklerde belirtilen hiçbir sistem için bu peletlerin CO emisyonu açısından uygun olmadığı anlaşılmaktadır. Öte yandan TS EN 303-5 (Kazanlar - Katı yakıtlı kazanlar, elle ve otomatik yüklemeli, anma ısı çıktısı 500 kW'a kadar) standardında belirtilen CO emisyon değerlerine göre incelediğimiz tüm pelet örneklerinin "Sınıf 3" e girdiği ve manuel veya otomatik olarak çalıştırılabilen 50 kW ısı gücü değerine kadar tüm ısıtma sistemlerinde kullanılabilmesi, 10 pelet örneğinden 2'sinin (Ö5 ve Ö10) haricinde diğer 8 örneğin ise 50 kW-150 kW ısı güce sahip sistemlerde (manuel veya otomatik), kullanılabilmesi fakat 150 kW-500 kW ısı güce sahip sistemlerde hiçbir pelet örneğinin kullanımının uygun olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca "Sınıf 4" ve "Sınıf 5" için belirtilen CO emisyon değerlerini ise hiçbir pelet örneğinin sağlayamadığı belirlenmiştir.

Baca gazı içerisindeki NO_x emisyon değerleri incelendiğinde pelet örneklerinin sadece üçünün (Ö1, Ö6 ve Ö7) Avrupa Birliği Ekodesign-direktifine göre belirlenmiş olan AB 2015/1185 ve 2015/1189 yönetmeliklerinin odun peletleri için belirlediği emisyon sınırını aşmadığı (106.3 ppm) dolayısıyla bu peletlerin ≤50 kW ısı gücü altındaki kapalı yanma odalı ısıtma sistemlerinde kullanılabilmesi anlaşılmaktadır. Ülkemizde 500 kW-300 MW ısı güce sahip katı yakıt yakılan kazanlar için düzenlenmiş olan "Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (SKHKKY, 2014)"nde belirlenen emisyon limitleri incelendiğinde de bu yönetmeliklerde belirtilen 50 MW-100 MW arasında ısı güce sahip sistemlerde Ö5 ve Ö10 örnekleri hariç tüm peletlerin NO_x sınırını aşmadığını yani %80' inin kullanıma uygun olduğu, 1000 MW-300 MW arasında ısı güce sahip sistemlerde ise pelet örneklerinin %50'sinin (Ö1, Ö2, Ö3, Ö6 ve Ö7) kullanımının NO_x emisyonu açısından uygun olduğu, 300 MW ısı gücünün üstündeki sistemlerde ise Ö1, Ö6 ve Ö7 peletlerinin NO_x emisyon sınır değeri açısından kullanıma uygun olduğu belirlenmiştir.

Baca gazı içerisindeki SO_x emisyon değerleri SKHKKY dikkate alınarak incelendiğinde pelet örneklerinin bu yönetmelikte belirtilmiş olan sınır değerinden (70 ppm) oldukça düşük olduğu ve tüm örneklerde SO₂ emisyonlarının 0-5.33 ppm arasında değiştiği ve bu yönüyle tüm sistemlerde kullanımının uygun olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde Zengin vd. (2020) orman artıklarından elde edilmiş olan pelet örnekleri için SO₂ emisyon değerlerini 2.00-7.67 ppm arasında belirlemişlerdir.

Çizelge 5. Pelet örneklerinin baca gazı analiz sonuçlarına ilişkin ortalama ve standart sapma değerleri

Örnek No	BG sıcaklığı (°C)	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	NO (ppm)	NO _x (ppm)
Ö1	77.99 ^(0.05)	18.03 ^(0.25)	1478.00 ^(40.65)	3.37 ^(0.31)	0.67 ^(0.42)	83.67 ^(3.09)	84.33 ^(3.30)
Ö2	85.00 ^(1.41)	14.20 ^(1.98)	1810.00 ^(32.66)	3.57 ^(0.54)	0.00 ^(0.0)	109.67 ^(7.59)	114.67 ^(8.38)
Ö3	79.00 ^(0.0)	11.67 ^(1.51)	1937.33 ^(169.49)	4.57 ^(0.75)	0.00 ^(0.0)	168.33 ^(10.53)	177.00 ^(10.98)
Ö4	83.00 ^(0.82)	12.70 ^(1.98)	1849.33 ^(116.78)	3.87 ^(0.25)	0.00 ^(0.0)	139.00 ^(6.16)	144.00 ^(7.35)
Ö5	78.40 ^(0.08)	10.63 ^(1.68)	2375.00 ^(125.76)	10.00 ^(1.63)	3.33 ^(0.45)	203.00 ^(28.99)	213.00 ^(30.41)
Ö6	78.07 ^(0.05)	14.30 ^(0.16)	2127.00 ^(203.37)	6.23 ^(0.12)	5.33 ^(0.47)	81.00 ^(5.10)	85.00 ^(5.35)
Ö7	77.90 ^(0.08)	17.77 ^(0.21)	1443.00 ^(154.03)	3.07 ^(0.21)	0.33 ^(0.47)	79.67 ^(4.92)	83.67 ^(5.44)
Ö8	78.67 ^(0.47)	11.70 ^(0.30)	2010.00 ^(64.81)	4.73 ^(0.33)	0.67 ^(0.41)	149.67 ^(3.86)	186.00 ^(5.89)
Ö9	81.11 ^(0.77)	13.04 ^(0.13)	1734.67 ^(46.91)	3.90 ^(0.29)	0.33 ^(0.38)	134.67 ^(4.11)	147.33 ^(5.25)
Ö10	77.13 ^(0.21)	11.33 ^(1.23)	2369.67 ^(124.93)	9.67 ^(0.79)	2.67 ^(0.40)	218.00 ^(13.37)	220.00 ^(17.96)

Pelet örneklerinin pelet sobasında yakılması sırasında oluşan baca gazı sıcaklık değerleri 77.13 - 85 °C arasında değişmiştir. Sungur vd. (2018) baca gazı kanal ve borularının yüzey sıcaklıklarının 100 °C'yi geçmemesinin gerektiğini belirtmişlerdir ve dolayısıyla incelediğimiz tüm pelet örnekleri için oluşan baca gazı sıcaklık değerlerinin bu değeri geçmediği anlaşılmaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada ülkemizde üretilen ve ticari olarak satışı yapılan pelet örneklerinin kalite özellikleri ve baca gazı emisyonları belirlenerek ülkemizde ve Dünya'da geçerliliği olan farklı standart ve yönetmeliklerdeki sınır değerlerle karşılaştırılmıştır.

Ülkemizde de geçerli olan ISO 17225-2 standardında belirtilen kalite özelliklerine ilişkin sınır değerler açısından da pelet örneklerinde uzunluk, nem içeriği, ısı değer açısından tüm örneklerin tamamının standartlara uygun olduğu (örneklerin %100'ü); çap, yığın yoğunluğu açısından örneklerin %80' inin uygun olduğu belirlenmiştir. Öte yandan kül içeriği sonuçları incelendiğinde, ENplusA1 sınıfına uygun pelet örneği olmadığı, örneklerin %40' ının ENplusA2 sınıfına ve %80' inin ise ENplusB sınıfına girdiği, örneklerin %20' sinin standart dışı olduğu saptanmıştır.

Araştırma kapsamında ele alınan örneklerde, ISO17225-2 standardının yanısıra diğer standartlara kalite özellikleri açısından uygunluk durumları da aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Uzunluk özelliğinin örneklerin %100'ünde tüm standartlara uygun değerlerde olduğu,
- Çap özelliği örneklerin %100'ü DIN51731 normuna uygunken %80'inin ÖNORM7135 ve Avrupa EN normlarına uygun değerlerde olduğu,
- Pelet yoğunluk değerlerinin pelet örneklerinin %80'inin DIN51731'e uygun ve sadece %20'sinin DINPlus'a uygun değerlerde olduğu,
- Yığın yoğunluk değerleri için bu standartlar arasında sadece ISO17225-2'de alt sınır değer belirtildiği ve peletlerin %80'inin bu standartta belirtilen Avrupa EN normlarına uygun değerlerde olduğu,
- Nem içeriklerinin ve ısı değerlerin örneklerin %100'ünde de tüm standartlara uygun değerlerde olduğu,
- Kül içeriklerinin örneklerin %70'ün DIN51731 normuna uygunken, hiçbirinin DINPlus ve ÖNORM7135' uygun olmadığı, %40'ının ENplusA2 sınıfına ve %80'ninin ENplusB sınıfına uygun değerlerde olduğu,
- Mekanik dayanıklılık değeri için sadece ISO17225-2'de alt sınır belirtildiği ve örneklerin %60'ının hem ENplusA1 hem de ENplusA2 sınıfına ve %80'inin ENplusB sınıfına uygun değerlerde olduğu,

Araştırma kapsamında ele alınan pelet örneklerinin yakılması ile ortaya çıkan baca gazı emisyon değerlerinin AB ülkelerinde ve ülkemizde geçerli olan yönetmeliklere ve standarda uygunluk durumları da aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Pelet örneklerinin yakılması ile ortaya çıkan baca gaz örneklerindeki CO emisyon değerleri AB2015/1185 ve 2015/1189 yönetmeliklerinde belirlenen emisyon sınır değerini aşmıştır dolayısıyla bu direktifte belirtilen hiçbir ısıtma sisteminde bu çalışma kapsamında incelenen pelet örneklerinin uygun olmadığı,
- IKHKY ve SKHKY'de belirlenen emisyon limitleri incelendiğinde de bu yönetmeliklerde belirtilen yakma sistemlerinde pelet örneklerinin CO emisyonu açısından uygun olmadığı,
- TS EN 303-5 standardında belirtilen CO emisyon değerlerine göre incelenen tüm pelet örneklerinin sadece "Sınıf 3"e 50 kW ısı güç değerine kadar tüm ısıtma sistemlerinde kullanılabilmesi, peletlerin %80'inin 50kW-150 kW ısı güce sahip sistemlerde kullanılabilmesi fakat daha yüksek ısı güce sahip sistemler için hiçbirinin kullanımının uygun olmadığı,
- Pelet örneklerinin %30'unda yakma sonucu ortaya çıkan baca gaz örneklerindeki NOx emisyon değerlerinin Avrupa Birliği Ekodesign-direktifinde belirlenen değeri aşmadığı ve ≤50 kW ısı güç altındaki kapalı yanma odalı ısıtma sistemlerinde kullanılabilmesi,

-NO_x emisyonu açısından SKHKKY’de belirlenen emisyon limitleri incelendiğinde de bu yönetmeliklerde belirtilen 50 MW-100 MW arasında ısı güce sahip sistemlerde örneklerin %80’inin kullanıma uygun olduğu, 1000 MW-300 MW arasında ısı güce sahip sistemlerde ise pelet örneklerinin %50’sinin kullanımın uygun olduğu, 300 MW ısı gücünün üstündeki sistemlerde ise peletlerin %30’unun kullanıma uygun olduğu,

-SO_x emisyon değerlerinin SKHKKY’ya göre sınır değerden düşük olduğu ve tüm sistemlerde kullanımının uygun olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma, kalite özellikleri ve baca gazı emisyonları belirlenen odun peletlerinin 50 kW ısı gücü değerine kadar olan ısıtma sistemlerinde ısıtma amaçlı kullanıma uygun olduklarını ve bu açıdan petrol ve doğalgaz gibi fosil kökenli yakıtlara iyi bir alternatif olabileceklerini göstermiştir. Ülkemizde pelet yakıtı sektörünün mevcut durumu ve gelecek öngörülerine ilişkin yapılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere pelet yakıtı Türkiye için nispeten yeni bir ürün ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ülkemizde resmi olarak faaliyet gösteren oldukça az sayıda pelet imalatçısı bulunmakta (yaklaşık 30) ve bu firmalar pelet imalatında genellikle odun kullanmaktadırlar. Öte yandan resmi pelet yakıtı üreticilerinin yanı sıra ülkemizin hemen her bölgesinde önemli sayıda gayri resmi pelet yakıtı üreticisinin de bulunduğu görülmektedir. Ülkemiz 2021 yılı itibarıyla Avrupa ülkelerine ürünlerini ihraç edebilecek yalnızca iki ENplus sertifikalı özel pelet yakıtı üreticisi ile temsil edilmektedir. ENplus Belgesi alma süreci ise oldukça uzun bir denetim, test vs. gerektirdiği için ülkemizde üretilen pelet yakıtların büyük çoğunluğu iç piyasaya yönelik üretilmektedir. Buna rağmen pelet yakıtı halen yakıt türleri içerisinde pazarda küçük bir paya sahiptir. Gerek yurt içi tüketimde pazar payının gerekse ihracat potansiyelinin artırılabilmesi açısından bu araştırma sonuçları da dikkate alındığında ülkemizde imalatı yapılan peletlerin kalite özelliklerinin DINplus ve ÖNORM 7135 sınırları açısından (özellikle kül içeriği); baca gazı emisyon değerlerinin de Avrupa Birliği Ekodesign direktifinde belirtilen sınır değerler açısından geliştirilmesi gerekli ve önemlidir.

KAYNAKLAR

- Amann, M., Cofala, J., Klimont, Z., Nagl, C., Schieder, W. 2018. Measures to Address Air Pollution From Small Combustion Sources. Report for Specific Agreement 11 under Framework Contract ENV.C.3/FRA/2013/00131 of DG-Environment of the European Commission.
- Atchison, J.E., Hettenhaus, J.R. 2004. Innovative methods for corn stover collecting, handling, storing and transporting. Report No: NREL/SR-510-33893.
- Cochran, W.G. 1977. *Sampling Techniques*. 3rd Edition. John Wiley&Sons, New York.
- Çelik, B. 2011. *Pellet Üretim Tesisinin Fizibilitesi: Bartın Örneği*. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- EN14774-2, 2009. Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method European Committee for Standardization: Management Centre, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.
- EN14775, 2009. Solid biofuels - Determination of ash European Committee for Standardization: Management Centre, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels
- EN14918, 2009. Solid biofuels - Determination of calorific European Committee for Standardization: Management Centre, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels

- EN15103, 2009. Solid biofuels - Determination of bulk density European Committee for Standardization: Management Centre, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.
- EN15210-2, 2010. Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 2: Briquettes European Committee for Standardization: Management Centre, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.
- EN16127, 2012. Solid biofuels - Determination of length and diameter of pellets European Committee for Standardization: Management Centre, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.
- Gürdil, G.A.K., Baz Y.Ö., Demirel Ç, Demirel B. 2015. Yakıt peleti ve briketi için güncellenmiş avrupa birliği standartları ve ilgili parametreler. *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2): 147-156.
- Gürel, B. 2020. Türkiye'deki güncel biyokütle potansiyelinin belirlenmesi ve yakılmasıyla enerji üretimi iyi bir alternatif olan biyokütle atıklar için sektörel açıdan ve toplam yanma enerji değerlerinin hesaplanması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 407-416.
- Han, Y, Bakır, G. 2010. Özel besi işletmelerinin barınak yapısı ve etkileyen faktörler. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 41 (1): 45-51.
- IKHKY, 2009. Isınmadan Kaynaklanan Hava kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği.
- Karaca, N.K. 2021. *Current Status and The Future Projections of The Turkish Pellet Fuel Industry: A Survey Study*. The Graduate School of Social Sciences of Middle East Technical University, Master Thesis.
- Ray, A., Hoover A. N., Nagle N., Chen X., Gresham, G. 2013. Effect of pelleting on the recalcitrance and bioconversion of dilute-acid pretreated corn stover under low- and high- solids conditions. *Biofuels*, 4(3), 271-284.
- Sungur, B., Topaloğlu B., Özbey, M. 2018. Pelet yakıtlı yakma sistemlerinin ısıl performans ve emisyon açısından incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(693), 64-84.
- TS EN 303-5, 2021. Kazanlar-Bölüm 5: Katı yakıtlı kazanlar, elle ve otomatik yüklemeli, anma ısı çıktısı 500 kW'a kadar - Terim ve tarifleri, gerekler, deneyler ve işaretleme, Türk Standartları Enstitüsü.
- Tumuluru, J. 2016. Specific energy consumption and quality of wood pellets produced using high-moisture lodgepole pine grind in a flat die pellet mill. *Chemical Engineering Research & Design*, 110, 82-97.
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, T., Lau, A., Melin, S., Sowlati, T., Oveisi, E. 2010. Quality of wood pellets produced in British Columbia for export. *Applied Engineering in Agriculture*, 26(6): 1013-1020.
- Yamane, T. 2006. *Temel Örnekleme Yöntemleri*. Çev. Esin, A., Bakır, M.A., Aydın, C, Güzbüzel, E. Literatür Yayınları: 53. İstanbul.
- Zengin Y., Efendioğlu Çelik A., Dok M., Çolak S., Kargıdan A.İ., Çakır A., Semercioğlu A. 2020. Orman atıklarının pelet olarak değerlendirilme imkânlarının araştırılması. *Ormanlık Araştırma Dergisi*, 7:2, 113-119.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Research Questions & Purpose

Chemical and mechanical properties of pellet fuels such as good burning, high efficiency, low emission and particle emission are important factors affecting the amount of ash and slag waste. Considering these factors, it is expected that the pellets to be produced and used should be comply with the relevant standards. As quality characteristics which are also specified in the standards for pellet fuels are expected as low moisture content, high thermal values, low ash content and high density values. Pellet dimensions are also among the features that play an important role in easily transporting the pellet from the hopper to the combustion chamber. It is also important to determine the emission values of the gases (CO, CO₂, O₂, NO_x, SO_x, etc.) in the flue gas resulting from combustion in order to determine the combustion characteristics and the environmental effects of the fuel used in the systems such as stove, boiler where pellets are used. When the label information given by the manufacturer on the packaging for wood pellets produced and sold in Turkey is examined, it is seen that some of the information that should be given about the quality characteristics is generally not given fully or is given incomplete and wrong.

In this research, the quality properties of wood pellet samples produced and sold in Turkey as fuel and the compliance of these properties to related standards accepted for fuel properties of solid biofuels used also in Turkey (German DIN norms, Austrian Ö-norms and European EN norms) were investigated. In addition, the emission values and temperatures of the flue gases resulting from combustion were also determined. Emission limit values of specified in the different regulations and standards such as regulations of EU 2015/1185 and 2015/1189 determined according to the European Union Ecodesign-directive, standards of TS EN 303-5 (2021), regulation of "Industrial Air Pollution Control Regulation" (2014) and regulation of "Control of Air Pollution Resulting from Heating" (2009) were investigated. Then evaluation was made to determine which samples would be suitable for use in which combustion systems according to these emission limit values.

Methodology

The quality properties including dimensions and flue gas emission values of wood pellets samples were measured standard methods. In the experiments, first of all, sample volume was determined and wood pellet samples were obtained. Samples were collected from 10 different companies that manufacture and sell wood pellets from 5 different cities in Turkey. Sample volume (sample size) in this research was determined by taking into consideration of the number of official manufacturers (30). It is understood that it is sufficient to include the pellets, which are the products of 3 manufacturers (10% of the total number of manufacturers) into this research. But the sample volume has been chosen as 10 by keeping it as large as possible.

Wood pellet samples were named and numbered with the letter Ö (Ö1...Ö10). The length (mm), diameter (mm), density (kg/m³), mechanical strength (%), moisture content (%), ash content (%), calorific (heating) value (MJ/kg) as quality criteria were determined according to related standards. Standard measurements of diameter (EN 16127), length (EN 16127), pellet particle density (EN 16127) and bulk density (EN 15103), which are among the pellet quality characteristics, were made with 10 replications while the moisture content (EN 14774-2), ash content (EN 14775), mechanical strength (EN 15210-2) and heating value (EN 14918) measurements were performed with 3 replications. For

the flue gas analysis, the pellets were first burned in the combustion stove and the flue gas emission values (O_2 , CO_2 , CO , NO , NO_x and SO_2) formed as well as the flue gas temperature were measured using a flue gas analyzer. Finally, measured values for quality properties and flue gas emission of wood pellets were investigated in terms of the compliance with different standards and regulations. Results of quality properties were compared with the standards of DIN51731, DIN Plus, ÖNORM 7135, ISO 17225-2. The flue gas emission results were compared with the emission limits specified by the European Union regulations of 2015/1185 and 2015/1189, regulations on "Control of Industrial Air Pollution" (SKHKKY) and "Regulation on Control of Air Pollution Resulting from Heating" (IKHKKY) and TS EN 303-5 standard.

Results and Conclusions

According to the measurement results, it was determined that the length value is between 15.69-30.82 mm, the diameter value is between 6.06-10.39 mm, the density value is between 0.51-1.15 kg/m^3 , the mechanical strength value is 95.11-99.22%, moisture contents between 4.32-5.72%, ash contents between 1.03-2.03%, and heating values between 18.08-18.49 MJ/kg. Among the flue gas emission values, the O_2 content was measured between 12.7%-71.7%, the amount of CO was measured between 1443-2127 ppm, and the amount of NO_x was measured between 83.7-213 ppm. In terms of the limit values for the quality characteristics specified in the ISO 17225-2 standard, which is also valid in our country, 100% of the samples are suitable in terms of length, moisture content and heating value; In terms of diameter and bulk density, 80% of the samples were determined to comply with the standards. On the other hand, when the ash content results were examined, it was determined that the samples were not suitable for ENplusA1 class, 40% of the samples were in ENplusA2 class and 80% were in ENplusB class, 20% of the samples were non-standard. The CO emission values in the flue gas samples resulting from the burning of the pellet samples exceeded the emission limit value determined in the EU regulations, so it was determined that the pellet samples examined within the scope of this study were not suitable for any heating system specified in the EU Ecodesign-directive. Likewise, when the emission limits determined in IKHKKY and SKHKKY are examined, it has been determined that the pellet samples are not suitable in terms of CO emission in the combustion systems specified in these regulations. According to the CO emission values specified in the TS EN 303-5 standard, all the pellet samples we examined can only be used in all heating systems up to "Class 3" up to 50 kW thermal power, 80% of the pellets can be used in systems with 50 kW-150 kW thermal power, but it has been determined that none of them is suitable for systems with higher thermal power. Considering the results of this research in terms of increasing both the market share in domestic consumption and the export potential of the pellets produced in Turkey, it is clear that improvement of the quality characteristics (in terms of DINplus and ÖNORM 7135 limits especially ash content) and flue gas emission (in terms of the limit values specified in the European Union Ecodesign directive) is necessary and important.

Yazarların Biyografisi



Türkan AKTAŞ

1994 yılında Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümünde lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Trakya Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı'nda 1996 yılında yüksek lisans eğitimini, 2000 yılında ise doktora eğitimini tamamladı. 2008 yılında Tarımsal Mekanizasyon Bilim Alanında Üniversite Doçenti unvan ve yetkisini aldı. 2014 yılından bu yana Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği, Tarımsal Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda Profesör olarak görevini sürdürmekte. Tarım ürünlerinin kurutulması, Biyolojik malzemelerin mühendislik özellikleri, Termokimyasal enerji dönüşüm yöntemleri konularında uzman. Adres: Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, 59030, Tekirdağ, Türkiye. Tel: +90-282-2502262.

İletişim

taktas@nku.edu.tr

ORCID Adresi

<https://orcid.org/0000-0001-9977-859X>