

Kısa analiz verileri kullanılarak farklı çam peletlerinin üst ısı değerinin hesaplanması ve uluslararası pelet standartlarına uygunluğu

Calculation of higher calorific value of different pine pellets using proximate analysis data and compliance with international pellet standards

Zehra YILDIZ*¹ 

¹Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Tarsus/Mersin, Türkiye

Eser Bilgisi/Article Info

Araştırma makalesi/Research article

DOI: 10.17474/artvinofd.1652635

Sorumlu yazar/Corresponding author

Zehra YILDIZ

e-mail: zyildiz@tarsus.edu.tr

Geliş tarihi / Received

06.03.2025

Düzeltilme tarihi / Received in revised form

09.05.2025

Kabul tarihi / Accepted

09.05.2025

Elektronik erişim / Online available

15.05.2025

Anahtar kelimeler:

Biyopelet

Üst ısı değeri

Kısa analiz

Orman atıkları

Keywords:

Biopellet

Higher heating values

Proximate analysis

Forest waste

Özet

Biyopelet, atık biyokütlelerden elde edilen yerli ve yenilenebilir bir katı biyoyakıttır. Ülkemizde orman atık ürünlerinin biyopelet olarak değerlendirilmesinin atıkların geri kazanılmasına ve enerji üretimine etkisi önemlidir. Orman atıklarının biyopelete dönüştürülmesi ile ısı değeri yüksek ve yığın yoğunluğu fazla katı biyoyakıt elde edilebilir. Yakıtlar ısı elde etmek için kullanılan kimyasal maddeler olup, yakıtların en önemli özelliği ısı değeridir. Yakıtın ısı değeri, kısa analiz ve/veya elementel analiz sonuçlarına göre hesaplanan matematiksel modellerden ya da kalorimetre cihazı ile belirlenebilmektedir. Bu çalışmada dört farklı çam biyopeletinin üst ısı değeri deneysel ve teorik olarak belirlenmiştir. Biyopeletlerin üst ısı değerleri (ÜİD) kısa analiz sonuçları kullanılarak literatürde yer alan biyokütle ve her türlü yakıt için kullanılan dört matematiksel model yardımıyla hesaplanmış ve deneysel değerleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak belirlenen ÜİD değerleri ile uyumlu olan kısa analiz sonuçlarından hesaplanan ÜİD en yüksek korelasyon değerini ($R^2=0.8669$) veren denklemin $\text{ÜİD}=0.3536SK+0.1559UM-0.0078K$ olduğu belirlenmiştir. Bu denkleme göre biyopeletin ısı değerini uçucu madde, sabit karbon ve kül miktarı etkilemiştir. Ayrıca çam peletlerinin nem miktarı, kül miktarı ve üst ısı değerleri uluslararası pelet standartlarındaki değerler ile karşılaştırılmıştır. En düşük kül ve en yüksek üst ısı değeri olan ÇAP 2'nin en uygun çam peleti olduğu belirlenmiştir.

Abstract

Biopellet is a local and renewable solid biofuel obtained from waste biomass. In our country, the use of forest waste products as biopellets has an important effect on waste recovery and energy production. By converting forest waste into biopellet, solid biofuel with high calorific value and high bulk density can be obtained. Fuels are chemical substances used to obtain heat, and the most important property of fuels is calorific value. The calorific value of fuel can be determined by mathematical models calculated according to proximate analysis and/or chemical analysis results or by calorimeter device. In this study, the higher heating values of four different pine biopellets were determined experimentally and theoretically. The higher heating values (HHV) of biopellets were calculated by using proximate analysis results with the help of four mathematical models used for biomass and all kinds of fuels in the literature and compared with experimental values. It was determined that the equation $\text{HHV}=0.3536SK+0.1559UM-0.0078K$, which gives the highest correlation value ($R^2=0.8669$) of HHV calculated from proximate analysis results, which is most compatible with the experimentally determined HHV values. According to this equation, volatile matter, fixed carbon and ash amount affected the calorific value of biopellet. In addition, the moisture content, ash amount and upper calorific values of pine pellets were compared with the values in international pellet standards. It was determined that ÇAP2, which has the lowest ash and highest upper calorific value, is the most suitable pine pellet.

GİRİŞ

Odun hammaddesi, endüstride en çok kullanılan hammadde olup dünyada 10 bin kadar kullanım alanı bulunmaktadır (Ünver ve Acar 2005). Teknolojik gelişmelerle birlikte kullanım alanı artan odun hammaddesi eldesi için özellikle odunsu atıklar gibi orman atıkları kullanılmaktadır. Odunsu atıklar, birçok

ürünün imalatı için değerli bir kaynak olmakla beraber elektrik veya ısı üretimi için alternatif bir yakıttır. Orman atıklarının doğrudan yakılması yerine çeşitli süreçlerle yakıt kalitesi artırılıp, kolay taşınabilir, depolanabilir ve kullanılabilir alternatif katı biyoyakıtlar elde edilerek biyoekonomiye kazandırılması önemlidir. Biyoekonomi, yenilenebilir biyolojik kaynakların üretimi, gıda, yem, biyoürünler ve biyoenerjiye dönüştürülmesi ile ilgilidir.

Orman temelli biyoekonomi ise orman ekosistemi hizmetlerinin ekonomik kullanımı başta olmak üzere orman ekosistemi hizmetleriyle ilgili tüm ekonomik faaliyetleri kapsar (Başkent 2023).

Ormanlar endüstriyel odun gereksiniminin yanısıra odun peleti üretimine kaynaklık ederek enerji üretimine önemli katkılar sağlayabilmektedir. Odun peleti, üretim teknolojisinin kolaylığı, ekolojik ve ekonomik olması gibi özellikleri ile yenilenebilir enerji kaynakları içinde öne çıkan katı bir biyoyakıttır. Özellikle tarım ve orman atıkları gibi bitki kökenli atıkların düşük yoğunlukta olması ve yüksek nem ihtiva etmesi katı yakıtı dönüştürülmede ciddi sorunlara yol açmaktadır. Peletleme işlemi ile biyokütle atıkları daha az yer kapladığı için taşıma, depolama ve nakliye maliyetleri azalmaktadır (Küsek ve ark. 2015, Bilgin ve ark. 2016).

Son zamanlarda enerji ihtiyacı için kullanılan biyopeletlerin uluslararası katı yakıt pazarında talebi fazla olup, önemli katı biyoyakıtlardan biri olmakla beraber işlem hacmi açısından biyodizel ya da biyoetanol ile rekabet edebilir durumdadır (Zengin ve ark. 2020). Biyokütle talebinin %85'ini odun talaşı, odun peleti ve geleneksel biyokütle kaynakları gibi katı biyoyakıtlar, %7'sini sıvı biyoyakıtlar, %5'ini belediye ile endüstriyel atıklar ve %3'ünü biyogaz oluşturur. Katı biyokütle arzının çoğunluğunu, odun talaşı, odun peleti ve odun kömürü gibi biyoyakıtlar oluşturmaktadır (Cui ve ark. 2021).

Biyopeletin en büyük tüketicileri başta Japonya ve Kore olmak üzere Avrupa, Amerika ve Asya'dır. Güney Kore 3.4 milyon ton/yıl ve Japonya 1 milyon ton/yıl üzerinde pelet ithalatı yapmıştır (Toksoy ve ark. 2020). Biyopeletler, yaklaşık 20 yıldır birçok Avrupa ülkesinde üretilmekte ve Avrupa'nın neredeyse tamamında yakıt olarak kullanılmaktadır. Biyopeletler İskandinavya ülkelerinde de katı yakıt olarak tercih edilmekte özellikle Finlandiya yakıt ihtiyacının %96'sını biyopeletlerden karşılamaktadır (Zengin ve ark. 2020). Ülkemizde biyopelet üreten çok az sayıda tesis bulunmakta olup, bu tesisler ham madde olarak çoğunlukla odun tozunu kullanmaktadırlar. Odun tozu, pelet ve lif levha sektörü tarafından yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple odun tozu fiyatı artmakta dolayısıyla pelet üretim maliyeti yükselmektedir. Ayrıca lif

levha kuruluşlarının odun tozuna olan yoğun talebinden dolayı pelet sektörü ham madde sıkıntısı yaşamaktadır. Hammadde sıkıntısından dolayı pelet üretim tesislerinde aksaklıklar olmakta hatta bazı tesisler kapanmakla karşı karşıya bulunmaktadır. Pelet üretimine uygun orman atıkları, ham madde sıkıntısı yaşayan pelet sektörüne alternatif ham madde kaynağı olabilir (Ulusoy ve ark. 2016).

Ülkemizin %27'si ormanlarla kaplı olup, orman varlığı 20.7 milyon hektardır (Ateş ve ark. 2007). Ülkemizde orman varlığında Mersin ili 835 bin hektarla Antalya ve Kastamonu'dan sonra üçüncü sırada bulunmaktadır (Yeşilkaya ve ark. 2022). Orman alanın %48'lik bölümü verimli orman olarak kabul edilir. Kızılçam, 5.8 milyon hektar ile orman alanı içerisinde en geniş yayılımı yapan türdür. Karaçam ise 2.2. milyon hektar alan ile kızılçamdan sonra en fazla yayılım yapan türdür (Ateş ve ark. 2007, Türkoğlu ve Gökoğlu 2017). Bununla beraber kereste fabrikaları, panel değirmenleri ve yonga değirmenleri gibi birincil değirmenlerdeki cips, talaş ve ağaç kabuğu dahil toplam değirmen kalıntısının %89'u çam ve geri kalanı sert ağaç türlerindendir (OMKO 2022). Türkiye'nin orman atık potansiyeli yüksek olup, yıllık orman varlığı atıkları 3.914.904 ster ve enerji potansiyeli karşılığı 859.899 (TEP/yıl)'dır (URL-1). Bir ağacın yaklaşık %25'i dal, gövde kabuğu ve uç parçalardan oluşur. Ormanlarımızda her yıl yaklaşık 7 milyon m³ kadar ağaç atığı ormanda çürümeye terk edilmektedir. Çok büyük miktardaki bu orman atıkları enerji üretiminde değerlendirilerek ülke ekonomisine kazandırılabilir (Saraçoğlu 2002). Orman atıklarından pelet üretilerek ısı değeri yüksek ve yığın yoğunluğu düşük, çevre dostu, ekonomik, yerli ve yenilenebilir bir yakıt elde edilir. Odun peleti, odun atıklarının kurutulup öğütüldükten sonra yüksek basınç altında sıkıştırılmasından elde edilen 6-10 mm çapındaki yakıt çubuklarıdır. Peletler, homojen boyuta ve şekle sahip olmasından dolayı yakma sistemlerine otomatik olarak beslenerek materyal daha etkin kullanılır. Odun peletleri talaş, odun yongaları ve ağaç kabukları gibi orman ürünlerinden elde edilir.

Ormancılık faaliyetleri sonucunda en fazla orman artığı çam ağaçlarına ait olduğu için bu çalışmada dört farklı çam biyopeleti ele alınmıştır. Mersin, ülkemizde en fazla

orman varlığı olan üçüncü il olup, orman alanı içerisinde en geniş yayılımı yapan tür çam ağaçlarıdır. Bu sebeple Mersin ilinin çam ormanları atıklarının pelet olarak değerlendirilmesinin bölge ekonomisine önemli katkıları olacağından bu çalışmada çam peletleri incelenmiştir. Peletlerin kısa analiz (kül, nem, uçucu madde ve sabit karbon) sonuçlarına göre üst ısı değerleri literatürdeki farklı modellere göre hesaplanmış ve deneysel olarak belirlenen üst ısı değeri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca peletlerin kısa analiz sonuçları uluslararası pelet standartlarına uygunluğu da belirlenmiştir.

BİYOPELET STANDARTLARI

Uluslararası biyoyakıt ticaretinin yaygınlaşması ve kolaylaştırılması için standartlaşma çok önemlidir. Pelet yakıt standartlarında yanma ekipmanına uygun olarak kalite standartlarının geliştirilmesinden kaynaklanan farklılıklar vardır. Odun peletleri için Avrupa ENplus ve Almanya DINplus standartlarını kullanırken Kuzey Amerika ASTM, CANplus ve PFI standartlarını kullanmaktadır. Bu standartların dışında birçok ülkede peletler için ISO standartları da kullanılmaktadır. ENplus ve Kanada standardı olan CANplus pelet standartları birbirine benzerdir. ENplus standardı kendi içerisinde ENplusA1, ENplusA2 ve ENplusB olmak üzere üç sınıfa ayrılır. ENplusA1, kimyasal işlem görmüş odun artıkları için kullanılır. ENplusA2, kereste atıkları, sanayi faaliyetlerinde arta kalan odun kabukları ve köksüz ağaçları için kullanılır. ENplusB, ağaç, ağaç işleme sanayi atıkları, yan ürünler ve kullanılmış ahşap ürünler için kullanılır. Avrupa Birliği standartlarında biyokütlenin toplanması, depolanması, taşınması, üretim ekipmanları, güvenlik ve çevre hijyeni ile ilgili bilgi mevcut değildir. Amerikan Pelet Yakıtları Enstitüsü (PFI), standartları esas olarak kül içeriği, nem içeriği, uçucu organik bileşik, istifleme yoğunluğu ve numune hazırlama üzerine odaklanmıştır. PFI standardı, DINplus, ENplus ve CANplus standartlarına birbirine çok benzerdir. Avusturya da ONORM M 7135, Fransa'da ITEBE, İsveç'te SS 18 71 70, İsviçre'de SN 166000, Norveç'te NS 3165 ve İtalya'da CTI-R 04/5 pelet standartları vardır. İsveç ve Almanya standartları birbirine çok benzerdir. Birçok ülke pelet kullanımı ile ilgili yasal düzenlemeler yaparken Türkiye'de

biyopeletler için kalite standardı mevcut değildir (Yıldız 2024).

Uluslararası pelet standartlarında izin verilen nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon miktarı gibi kısa analiz sonuçları, alt-üst ısı değeri, parçacık boyutu, parça yoğunluğu, çap, uzunluk ve mekanik dayanımı gibi fiziksel özellikler ile C, H, N, S, Cl, Ar, Cd, Cr, Pb, Hg, Zn ve Ni gibi elementel analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Çizelge 1'de uluslararası odun pelet standartlarında izin verilen nem miktarı, kül miktarı ve üst ısı değeri (Q) verilmiştir. Çizelge 1'e göre peletlerin üst ısı değeri 16.5-19.5 MJ kg⁻¹, nem miktarı %6-15 ve kül miktarı %0.5-6 aralığında bulunmaktadır.

Yakıtın ısı değeri, biyopeletin yanma veriminin göstergesidir. Yakıtın ısı değeri ağaç cinsi, yoğunluk, nem, kül ve ekstratif madde miktarına göre değişir. Odun, pelete dönüştürüldüğünde ısı değeri yaklaşık 2 kat, brikete dönüştürüldüğünde 3 kat ve odun kömürü elde edildiğinde ısı değeri yaklaşık 4 kat artar (Yıldız 2024). Çizelge 1'de görüldüğü gibi biyopelet standartların çoğunda peletin üst ısı değeri 16.5 MJ kg⁻¹ ve üzerindedir. ONORM M7135 ve DIN Plus standardında 18 MJ kg⁻¹ üzerinde, DIN 51731 standardında 17.5-19.5 MJ kg⁻¹ arasında PFI standardında ise 19 MJ kg⁻¹ üzerinde olması istenmektedir.

Peletlerin kül içeriği ve kül miktarı yakıtın ısı değerini etkiler. Hammaddenin kül miktarı yüksek olursa ısı değeri o ölçüde az olur. Düşük kül miktarı peletin verimli yandığını, yanmayan kısmın ve mineral madde içeriğinin düşük olduğunu göstergesidir (Munawar ve Subiyanto 2014). Peletin yakılması sonucunda ortaya çıkan yanmamış inorganik katı atık olan kül, fosfat, klorür, sülfat gibi anyonlar, Na, K, Ca, Mg, Fe ve Mn gibi metaller ile oksitleri ve tuzlarından oluşur. (Bantacut ve ark. 2013, Munawar ve Subiyanto 2014). Yüksek kalite pelette kül oranı %1-2'yi geçmemelidir. Çizelge 1'den görüldüğü gibi en düşük kül miktarı ONORM M 7135, DIN Plus ve PFI Süper Premium standartlarında olup, izin verilen kül miktarı %0.5'tir. Pelet yapılmadan yakılan ağaçlarda ise %6-10 arasında değişmektedir. Pelet standartlarında izin verilen en yüksek kül miktarı %6'dır ve bu değer ITEBE ve PFI Utility standartlarına aittir.

Çizelge 1. Biyopelet standartları

Pelet standardı		Nem (%)	Kül (%)	Q (MJ/kg)
ISO 17225-6	I1	≤10	≤1	≥16.5
	I2	≤10	≤1.5	≥16.5
	I3	≤10	≤3	≥16.5
ONORM M7135		< 10	<0.5	>18
DIN	DIN 51731	<12	<1.5	17.5-19.5
	DIN Plus	<10	<0.5	>18
ITEBE		<15	≤6	>16.9
SS 18 71 70	Grup 1	≤10	<0.7	≥16.9
	Grup 2	≤10	<0.7	≥16.9
	Grup 3	≤12	<1.5	≥16.9
CTI-R 04/5	Pellet gold A1	≤10	≤0.7	≥16.9
	Pellet gold A2	≤10	≤1.5	≥16.9
PFI	PFI Süper Premium	≤6	≤0.5	-
	PFI Premium	≤8	≤1	-
	PFI Standard	≤10	≤2	>19
	PFI Utility	≤10	≤6	-
CAN	CAN plus A1		≤0.7	≥16.5
	CAN plus A2	≤10	≤1.2	≥16.5
	CAN plus B		≤2	≥16.5
EN	EN plus A1		≤0.7	≥16.5
	EN plus A2	≤10	≤1.2	≥16.5
	EN plus B		≤2	≥16.5

Nem içeriği, pelet kalitesini belirleyen en önemli özelliklerden biridir. Düşük nem içeriği pelet ateşlenmesini kolaylaştırır ve depolama ömrünü uzatır. Ancak bağlayıcısız pelet üretiminde biyokütlenin nemi düşük olduğunda pressleme sırasında ortaya çıkan ısı biyokütlenin tutuşup yanmasına sebep olabileceğinden peletin soğutulması gerekir. Ayrıca biyokütlenin topaklaşıp pelet haline gelmesi için de nem miktarının belirli düzeyde olması istenir. Yüksek nem içeriği ise peletleme süresini uzattığı gibi biyokütlenin pelet makinelerinin merdane, hazne ve dişli kısımlarına yapışarak düzgün çalışmasını engeller ve tıkanmaya neden olabilir. Çizelge 1’de görüldüğü gibi uluslararası pelet standartlarında nem miktarı %6-15 arasında değişmekte ve birçok pelet standardında %10’dur. En düşük nem miktarı PFI Süper Premium standardında olup %6’dır. En yüksek nem miktarı ise %15 ile ITEBE standardına aittir.

Yakıtların en önemli teknik özelliklerinden biri olan ısı değeri kalorimetre cihazı ile deneysel yöntemle tayin edilebilmektedir. Ayrıca tüm yakıtlar ve biyoyakıtlara özgü ısı değeri hesaplamak için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Üst ısı değeri tahmini için ortaya konan matematiksel denklemler yakma, gazlaştırma ve piroliz

performansının belirlenmesinde kullanılır (Korkmaz 2022). Isıl değeri teorik olarak belirlenmesinde model kullanımı kömür için yaygın bir şekilde ve uzun yıllardır yapılmaktadır ancak biyoyakıtların ısı değeri belirlenmesinde son zamanlarda kullanımı görülmektedir (Özyüğüran ve ark. 2018). Üst ısı değeri hesaplanması için kullanılan modellerin bir kısmı kısa analiz sonuçlarını bir kısmı elementel analiz sonuçlarını kullanırken az da olsa iki analizin sonucuna göre sonuç elde edilen modeller geliştirilmiştir. Kısa analiz veya elementel analiz sonuçlarına bağlı matematiksel modellere göre hesaplanan üst ısı değerleri deneysel yöntemle elde edilen sonuçlarla kıyaslanabilir. Biyopeletlerin üst ısı değerini belirlemek için kullanılabilecek en uygun model seçilebilir. Elementel analiz için yüksek hassasiyete sahip enstrümental cihazlar kullanıldığı için pahalı ve hazırlık aşamaları olduğu için zaman alabilir. Diğer taraftan nem, uçucu madde, kül ve sabit karbon miktarını içeren kısa analiz değerlerinden ısı değeri hesaplamak kimyasal analiz sonuçlarından hesaplamaktan daha pratik ve daha ucuz olmaktadır. Kısa analiz için her laboratuvarında bulunabilen etüv, kül fırını ve terazi gerekmektedir. Bu çalışmada biyopeletlerin üst ısı değerleri kalorimetre cihazı ile belirlenmiş ve biyoyakıtlar için kullanılan üst ısı değeri modelleri ile hesaplama yapılarak karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, dört farklı pelet firmasından temin edilen çam peletinin (ÇAP) kısa analiz sonuçları modelleme çalışmalarında kullanılmıştır. Pelet numuneleri öğütülerek nem, kül ve uçucu madde tayini gibi kısa analizleri yapılmıştır. Peletlerin üst ısı değeri, adyabatik kalorimetre bombası ile belirlenmiştir.

Nem tayini ASTM 3173'e göre yapılmıştır. Nem miktarını belirlemek için öğütülmüş pelet örneği yaklaşık 1 gram tartılmış, $105 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de etüvde sabit tartıma getirilmiş ve sabit tartım sonunda nem miktarı (N), ağırlık farkından Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlik 1'de ifade edilen m_0 başlangıç numune miktarını ve m_t sabit tartım sonrası pelet numune miktarını (g) göstermektedir.

$$\% \text{ Nem} = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

Kül tayini ASTM E1755-01'e göre yapılmıştır. Kül tayini (K), öğütülmüş numune porselen krozelere belirli bir miktar alındıktan sonra kül fırınında 600°C 'de sabit tartıma kadar bekletilir. Kül miktarı, sabit tartım sonucu pelet miktarının (m_t), başlangıç numune miktarına (m_0) oranı olarak Eşitlik 2'deki gibi bulunur.

$$\% \text{ Kül} = \frac{m_t}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

Uçucu madde miktarı tayini, ASTM E0872-82R19'a göre yapılmıştır. Uçucu madde miktarı (UM) tayini için kroze 1 g numune alınıp, kül fırınında $900 \pm 20^\circ\text{C}$ 'de 7 dakika bekletildikten sonra tartılıp, sabit tartıma gelene kadar işlem devam eder. Eşitlik 3 göre uçucu madde miktarı (UM) belirlenir. Eşitlik 3'te ifade edilen m_0 (g) başlangıç numune miktarı ve m_t (g) sabit tartım miktarı olup, N ise kullanılan örneğin nem miktarı (%) gösterir.

$$\text{Uçucu madde miktarı (\%)} = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100 - N \quad (3)$$

Sabit karbon miktarı (SK), Eşitlik 4'teki gibi diğer kısa analiz sonuçlarının toplamının yüzden çıkarılması ile belirlenir.

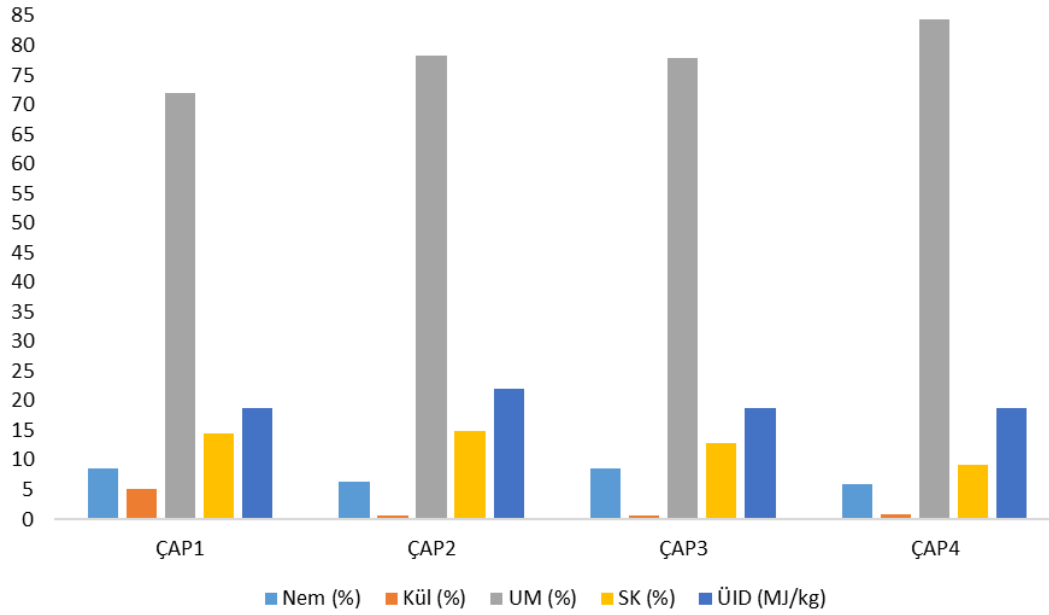
$$\text{SK} = 100 - (N + K + \text{UM}) \quad (4)$$

Pelet numunelerinin üst ısı değeri, ASTM D 5865-13 standardına göre IKA Werke marka adyabatik kalorimetre cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Belirli bir miktarda tartılan pelet örnekleri standart koşullarda bir kalorimetre bombasında oksijen ortamında yakılıp, kalorimetre kabı içindeki suyun sıcaklık artışına ve özgül ısı kapasitesine göre yanma entalpisi hesaplanarak üst ısı değeri belirlenmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çam Biyopeletlerin Uluslararası Pelet Standartlarına Uygunluğu

Bu çalışmada kullanılan çam peletleri, bağlayıcısız, soğuk presleme yöntemi ile elde edilmiştir. Pelet çapları 6-8 mm aralığında olup, peletlerin parça yoğunluğu $980-1200 \text{ kg m}^{-3}$ arasında değişmektedir. Yakıtların kısa analiz sonuçları, yakıtın genel özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir. Kısa analizde nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon miktarı belirlenir. Fakat uçucu madde ve sabit karbon miktarına uluslararası pelet standartlarında yer verilmemiştir. Diğer taraftan üst ısı değeri hesaplandığı matematiksel modellerde nem miktarı dikkate alınmamıştır. Bu sebeple uluslararası pelet standartlarında yer alan nem, kül ve üst ısı değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 1'de dört farklı pelet firmasının çam pelet numunesinin sonuçları verilmiştir. Çam peletlerinin kimyasal içeriğini farklı olmasından dolayı peletlerin kısa analiz sonuçları farklılık göstermektedir.



Şekil 1. Pelet numunelerinin kısa analiz sonuçları ve üst ısı değerleri

Yakıtın nem miktarı, ateşleme hızı, duman oluşumu, depolama ve taşıma maliyetlerini etkiler. Biyokütlenin başlangıçtaki düşük nem içeriği, suyun doğal buharlaşmasının ve plastikleşmenin oluştuğunu kanıtlar. Nem içeriğinin miktarı ne kadar düşüğe, buharlaşma için gereken ısı da o kadar düşüktür. Minimum nem miktarının varlığı, biyokütlerdeki nişastanın jelatinleşmesi daha sonra parçacıkların bağlanmasını teşvik eden kılcal basınç ve ara yüz kuvvetlerinin gelişmesi için gereklidir (Bantacut ve ark. 2013, İsmail ve ark. 2022). Şekil 1’de görüldüğü gibi çam peletlerinin nem miktarı, %5.90-8.52 aralığında değişmektedir. En düşük nem miktarı, ÇAP4 peletine (%5.90) aittir. En yüksek nem miktarı ÇAP1 peletine (%8.52) aittir. İzin verilen en yüksek nem miktarı %15 ile ITEBE standardına ve en düşük nem miktarı ≤6 ile PFI Süper Premium’a aittir. Standartlarda nem miktarı %6-15 aralığında değişmekte, birçok standartta ise %10’dur. %10’dan az nem içeriğine sahip biyopeletlerin, parçacıklardaki su ve lignin nedeniyle sıkı bir pelet yapısına sahip oldukları bilinmektedir, bu da yoğunlaştırma işlemi sırasında parçacıklar arasındaki bağlayıcı kuvveti artırır. Diğer taraftan, yüksek nem içeriği küf oluşumunu ve mikroorganizma faaliyetlerini arttırdığından peletin depolanma süresini azaltır (Asrianti ve ark. 2024). Çalışmada kullanılan tüm peletlerin nem miktarı %10’un altındadır. Sadece ÇAP4 çam peletinin nem miktarı %6’nın altında olup, PFI Süper Premium

standardındaki nem değerini sağlamaktadır. ÇAP2 ve ÇAP4’ün nem miktarı %8’in altında olduğu için PFI Premium standardındaki nem değerini sağlamaktadır.

Kül, metallerin halojenürlerle, oksijenle, fosfat ve sülfatla yaptığı bileşikler ile safsızlıkları içerir (Bantacut ve ark. 2013, Munawar ve Subiyanto 2014). Biyokütle peletlerinin kül miktarı arttıkça ısı değeri azalır. Düşük kül oranı yakma sisteminin verimini artırırken işletme maliyetlerini azaltır (Munawar ve Subiyanto 2014). Yüksek kül içeriği ise yanmamış malzemelerden ve kül oluşumuna katkıda bulunan diğer organik bileşenlerden kaynaklanır ve bunun sonucunda yüksek silika içeriği ortaya çıkar. Kül içeriğindeki artış, yanma sırasında mineral birikintileri veya cüruf oluşumu, yakma sistemlerinin yüzeylerinde korozyona sebep olurken düşük termal iletkenliğe yol açarak yanma verimini düşürür (Asrianti ve ark. 2024). Ev tipi bir sobada kül miktarı %0.5 olan 25 kg pelet yakıldığında yaklaşık 65 gr kül arta kalır (Abt ve ark. 2014). Yanma sonunda, linyit %15-25, kok ve antrasit %5 ve odun %3 kül bırakır (Tolay 2017). Şekil 1’de görüldüğü gibi pelet numunelerindeki kül miktarı, %0.64-5.07 arasında değişmektedir. Şekil 1’de görüldüğü gibi ÇAP1 dışındaki tüm peletlerde kül miktarı %0.71’in altındadır. En düşük kül miktarı ÇAP2 peletine (%0.64) ve en yüksek kül miktarı ise ÇAP1’e (%5.07) aittir. Çizelge 1’den görüldüğü gibi izin verilen en düşük kül

miktarı ONORM M 7135, DIN Plus ve PFI Süper Premium'un standardında olup, limit %0.5'tir ve hiçbir pelet bu standardı karşılamamaktadır. Uluslararası pelet standartlarında %6 ile izin verilen en yüksek kül miktarı ITEBE ve PFI Utility standartlarında bulunmaktadır. Şekil 1'den görüldüğü üzere çalışmada kullanılan bütün peletlerin kül miktarı %6'nın altındadır. Yüksek kalitede olan peletin kül oranı %1-2'yi geçmemelidir. Buna göre sadece ÇAP1 dışındaki diğer üç pelette kül miktarı %1'in altındadır.

Peletlerin ısı değeri, ağacın yaşı, kimyasal yapısı, yoğunluk, nem, kül ve ekstratif madde miktarlarına göre değişir. Özellikle nem miktarının artmasıyla yanma sonucunda elde edilen ısı bir kısmı suyun buharlaşmasında kullanıldığı için yakıtın ısı değeri azalır (Tolay 2017). Çizelge 1'de verildiği gibi uluslararası pelet standartlarında peletlerin üst ısı değeri ≥ 16.5 MJ/kg'dır. Avrupa standartlarına göre, bir materyalin yakıt olarak değerlendirilebilmesi için ısı değerinin ≥ 15.5 MJ/kg olmalıdır. Çalışmada kullanılan çam peletlerinin üst ısı değeri 18.7 MJ/kg üzerinde olduğu için peletler Avrupa standardına uygun yakıtlar olarak değerlendirilebilir. Şekil 1'den görüldüğü üzere en yüksek ısı değerine 21.924 MJ/kg ÇAP2 peleti sahiptir. En düşük ısı değere ÇAP3 sahip olup, 18.707 MJ kg⁻¹ dir. ÇAP2'nin üst ısı değerleri 19.5 MJ/kg üzerinde olduğu için PFI standardına göre uymakta ancak DIN 51731 standardına uymamaktadır. İğne yapraklı ağaçların ısı değerleri 19-20 MJ/kg arasında, geniş yapraklı ağaçların ise 14-19 MJ/kg arasındadır (Türkoğlu ve Gökoğlu 2017). Odun ve biçme atıklarının ısı değeri 18,5-20 MJ/kg, testere talaşı ve kontrplak atıklarının ısı değeri ise 19-19.2 MJ/kg arasında değişmektedir (Zengin ve ark. 2020). Çalışmada yer alan çam peletlerinin ısı değerleri 18.707-21.924 MJ/kg arasında olup, odundan daha yüksek ısı değere sahiptir.

Pelet yakıtlarının kalite standartlarında düşük nem içeriği, yüksek ısı değeri ve düşük kül içeriği olması istenir. Düşük nem miktarı ısı değeri artıran bir faktör olup, düşük kül miktarı baca gazı kanallarında ve ısı değiştirici yüzeylerinde cüruf oluşumunu önlemek için istenir (Sungur ve Topaloğlu 2018, Aktaş 2022). Kısa analiz sonuçları değerlendirildiğinde ÇAP2 en düşük kül miktarına ve en yüksek ısı değere sahiptir. Nem miktarı

ve kül oranı en yüksek olan ÇAP1 en düşük ikinci ısı değere sahiptir. PFI Standardı ısı değeri karşılayan tek pelet ÇAP2'dir.

Çam Biyopeletlerin Hesaplanan ve Deneysel Üst Isı Değerlerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada sadece biyokütle veya her türden yakıtın kısa analiz sonuçlarının ÜİD tahmini için kullanıldığı 18 matematiksel model Çizelge 2'de verilmiştir (Parikh ve ark. 2005, Yin 2011, Callejón-Ferreira ve ark. 2011, García ve ark. 2014, Akkaya 2016, Duranay ve Yılgin 2018, Taşar 2021, Korkmaz 2022, Yıldız ve Topkoç 2023). Çizelge 2'de verilen denklemlerden Eşitlik 5, 11, 14, 15 ve 18 doğrusal olmayan terimler içermektedir. Eşitlik 6, 8 ve 16, UM, SC ve K değerlerinin üst ısı değeri üzerine ortak etkisi bulunmakta olup, Eşitlik 1, 11 ve 17'de sadece K, Eşitlik 2'de sadece SK, Eşitlik 3'te sadece UM değerlerine bağlı iken diğer eşitliklerde yer alan denklemlerde üst ısı değeri iki bağımsız değişken ile ilişkilidir. Eşitlik 4'te UM'nin ters ilişkisi, K'nın yer alışı tüm eşitliklerde de K'nın ters etkisi ortaya konmuştur.

Çizelge 2. Kısa analiz sonuçlarına göre üst ısı değeri belirlenmesinde kullanılan modeller (MJ/kg)

No.	Eşitlik
E1	$19.914 - 0.2324K$
E2	$14.119 + 0.1965K$
E3	$0.416UM - 13.173$
E4	$35.430 - 183.5UM - 354.3K$
E5	$0.15734(UM + SK) + 4.24397$
E6	$1.999 + 0.248SK + 0.162UM - 0.137K$
E7	$-2.057 - 0.092K + 0.279UM$
E8	$0.3536SK + 0.1559UM - 0.0078K$
E9	$0.312SK + 0.1534UM$
E10	$-3.0368 + 0.2218UM + 0.2601SK$
E11	$18.3 - 0.00398K^2 - 0.1121K$
E12	$0.3543SK + 0.1708UM$
E13	$0.1905UM + 0.2521SK$
E14	$0.15734(UM + SK) + 4.24397$
E15	$-10.8141 + 0.3133(UM + SK)$
E16	$0.4108SK + 0.1934UM - 0.0211K$
E17	$20.086 - 0.261K$
E18	$76.56 - 1.3(UM + K) + 7.0310^{-3}(UM + K)^2$

Yüksek R² değeri modelleme alanında, elde edilen ve hesaplanan sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunun göstergesidir. Modelin uygunluğunu gösteren korelasyon katsayısı R² en az 0.80 olması istenir.

Şekil 1’de verilen kısa analiz sonuçlarına denklemlerde yerine yazılarak E1’den E18’e kadar olan denklemlerden sadece $R^2 > 0.80$ olan dört eşitlikten hesaplanan ÜİD değerleri ve deneysel olarak belirlenen ÜİD değeri (DİD) Çizelge 3’te verilmiştir. Çizelge 3’te görüldüğü gibi E8, E9, E12 ve E16 eşitliklerine ait R^2 değerleri 0.83’ün üzerindedir. Diğer eşitliklerden hesaplanan R^2 değerleri 0.4’ün altındadır. Düşük R^2 değerleri veren eşitlikler

doğrusal olmayan ve kül miktarının yüksek katsayı ile dahil edildiği modellerdir. En yüksek R^2 değeri E8’e ait olup, eşitlik uçucu madde, sabit karbon ve kül oranına göre değişmektedir. E16 eşitliği sadece kül miktarına göre üst ısı değeri vermekte ancak diğer üç eşitlikte üst ısı değeri uçucu madde ve sabit karbon miktarına göre değişmektedir.

Çizelge 3. Kısa analiz sonuçlarına göre hesaplanan üst ısı (MJ/kg) ve R^2 değerleri

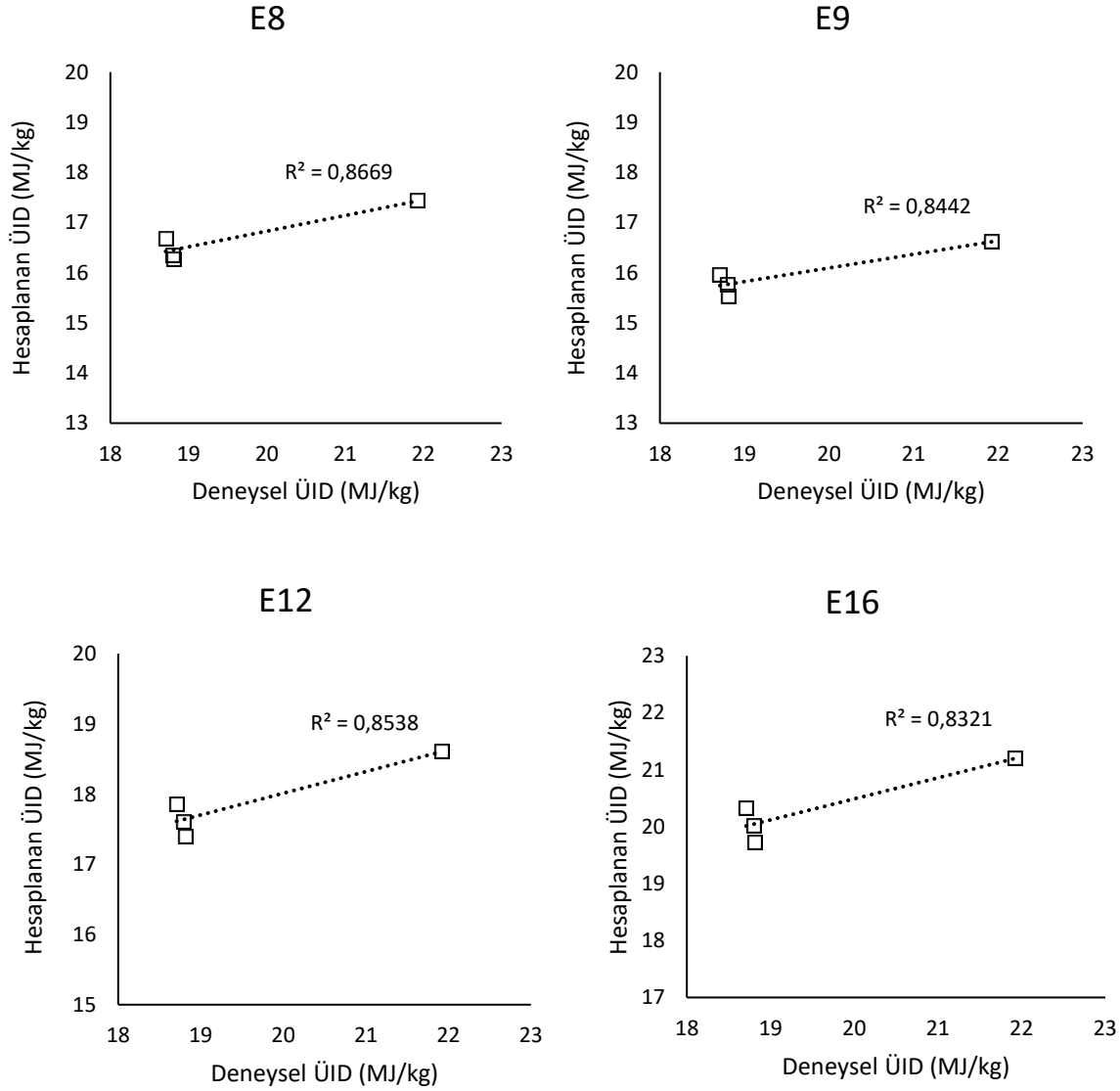
Pelet no	DİD	E8	E9	E12	E16
ÇAP1	18.811	16.280	15.541	17.403	19.737
ÇAP2	21.924	17.436	16.627	18.616	21.209
ÇAP3	18.707	16.689	15.965	17.865	20.338
ÇAP4	18.790	16.347	15.764	17.615	20.018
R^2		0.8669	0.8442	0.8538	0.8321

Şekil 2’de E8, E9, E12 ve E16 eşitliklerinden kısa analiz sonuçlarına göre hesaplanan ısı değerleri deneysel üst ısı değerlere karşı değişimi verilmiştir. Kısa analiz sonuçlarına göre hesaplanan ÜİD ile deneysel ÜİD arasında en fazla uyum $R^2=0.8669$ ile sabit karbon, uçucu madde ve kül miktarına bağlı olan E8 (ÜİD=0.3536SK+0.1559UM-0.0078K) eşitliğinde olduğu görülmüştür. Daha sonra en iyi uyum $R^2=0.8532$ ile ÜİD’in sabit karbon ve uçucu madde miktarına bağlı olduğu E12 (ÜİD=0.3543SK+0.1708UM) modelinde olduğu belirlenmiştir. E8 ve E16 modellerinde kül miktarı çıkarılarak üst ısı değeri hesaplanmıştır. Peletlerin ısı değeri kül miktarı ile azalmaktadır (Munawar ve Subiyanto 2014, Duranay ve Yılgin 2018). Çam peletlerin üst ısı değeri uçucu madde ve sabit karbon miktarına bağlı olan doğrusal modellerle daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Uluslararası pelet standartlarında verilmese de uçucu madde miktarı önemlidir. Uçucu madde biyokütlenin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Uçucu madde içeriği karbon, oksijen ve hidrojen dahil olmak üzere yakıtlardaki organik bileşiklerden etkilenir. Uçucu madde içeriği peletlerin yanma performansını etkiler ve yanma sırasında duman üretimini artırırken, daha yüksek uçucu madde içeriği düşük sıcaklıkta ateşlemeyi kolaylaştırırken yanma verimini iyileştirir ve duman üretimini azaltır.

Bununla birlikte, daha yüksek uçucu maddeye sahip yakıtlar daha az ısı yayarlar. Çünkü kütlelerinin önemli bir kısmı uçucu olarak salınır (Taşar 2021, Asrianti ve ark. 2024, Racero-Galaraga ve ark. 2024).

Yanma sırasında nem ve uçucu maddeler uzaklaştırıldıktan sonra, biyokütledeki sabit karbon oksijen ile tepkimeye girdiğinden, yakıtın ısı kaynağı olarak değerlendirilir. Biyokütledeki karbonun yaklaşık %80’i hidrojen veya oksijene bağlı olan organik karbondur. Organik karbon elementel karbondan daha uçucudur. Bu da reaktivitesini artırırbiyokütlenin ısı üretimini destekler ve özellikle bazı durumlarda %80 üzerinde yüksek uçucu madde içeriği nedeniyle yakıt ve kimyasalların üretiminde kullanılır (Racero-Galaraga ve ark. 2024). Karbonizasyon işlemi de uçucu madde bileşenlerini etkiler ve üründe artık karbon bırakır. Sabit karbon, yanma sürecinde uçucu bileşenlerin uzaklaştırılmasından sonra kalan katı madde miktarıdır ve yakıtın ısı değerini etkiler (Asrianti ve ark. 2024). Sabit karbon oranı, uçucu madde miktarından etkilenmekte olup, daha yüksek bir sabit karbon oranı ısı değeri artırmaktadır. Ayrıca yüksek sabit karbon seviyesi, yakıtın daha düşük sabit karbon seviyesine sahip yakıtlara göre daha yavaş yanma eğiliminde olduğunu gösterir (Mawardi ve ark. 2023). Sabit karbon ve uçucu madde miktarı ile biyokütlelerin üst ısı değeri artmaktadır (Taşar 2021).



Şekil 2. DeneySEL ve hesaplanan üst ısı değeri arasındaki ilişki

Kül, fırınlarda ve kazanlarda kirlenme, curufa ve korozyona neden olan biyokütledeki tüm yanıcı maddelerin tamamen yanmasından sonra kalan kalıntıdır. Peletlerin ısı değeri üzerine sabit karbon ve uçucu madde miktarının pozitif etkisi varken kül miktarının negatif etkisi vardır. Yakıtın kül içeriği ne kadar yüksekse, yakıtın ısı değeri o kadar düşüktür. Tersine, yakıtın kül içeriği ne kadar düşükse, yakıtın ısı değeri o kadar yüksektir. Bu sebeple üst ısı değeri hesaplanırken kül miktarı çıkarılarak modellere dahil edilmiştir. Ayrıca kül miktarının yüksek katsayı ile dahil olduğu modellerde uyumsuzluğun daha yüksek olduğu görülmüştür. (Sukarta ve ark. 2018, Mawardi ve ark. 2023).

SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan tüm çam peletlerin nem miktarı %6'nın altında olup, PFI Premium ve PFI Süper Premium standartları dışındaki tüm uluslararası pelet standartlarındaki nem miktarı ile uyumludur. ÇAP2 ve ÇAP4 peletlerinin nem değeri PFI Premium standardını karşılamaktadır. ÇAP2 ve ÇAP3 peletlerinin kül miktarı %0.7'nin altında olup, çoğu pelet standardı ile uyumludur. Çam peletinin üst ısı değeri >18.7 MJ/kg olup, ÇAP1 dışındaki diğer üç pelet PFI Standardı dışındaki diğer standartlarla üst ısı değerlerinin uygun olduğu tespit edilmiştir. ÇAP1 peleti sadece DIN 51731 standardına uymamaktadır. En az kül oranına ve en yüksek üst ısı değere ÇAP2 peletinin sahip olduğu belirlenmiştir.

Biyopelet üst ısı değeri hesaplanmasında kullanılan 18 matematiksel modelden yalnızca dördünün R^2 'si 0.8 üzerinde bulunmuştur. Eşitlik 8, 9, 12 ve 16 ile biyopeletlerin kısa analiz sonuçları ile üst ısı değerleri yüksek bir uygunlukla hesaplanabilir. En yüksek R^2 değeri 0.8669 olup, uçucu madde, sabit karbon ve kül oranına bağlı olan E8 eşitliğine aittir. Orman atıklarından elde edilen peletlerin katı yakıtla çalışan yakma sistemlerinde kazan yakıtı olarak kullanılması bölge kaynaklarının enerji ihtiyacının ekonomik ve ekolojik olarak sağlanmasına katkıda bulunabilir.

KAYNAKLAR

- Abt KL, Abt RC, Galik CS, Skog KE (2014) Effect of Policies on Pellet Production and Forests in the U.S. South: A Technical Document Supporting the Forest Service Update of the 2010 RPA Assessment. General Technical Report SRS-202. US Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC.
- Akkaya E (2016) ANFIS based prediction model for biomass heating value using proximate analysis components. *Fuel*, 180: 687-693.
- Aktaş T (2022) Türkiye’de imal edilen odun pelet örneklerinin kalite özelliklerinin ve standartlara uygunluğunun belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 8(1):25-40.
- Asrianti NP, Fahrudin F, Rhakasywi D, Martana B (2024) Analysis of calorific value of biopellet diameter variations through proximate test. *Journal La Multiapp*, 5(4): 488-500.
- Ateş S, Akyıldız MH, Vurdu H, Akgül M (2007) Türkiye’de orman kesim artıkları ve değerlendirilmesi. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 7(1): 93-103.
- Bantacut T, Hendra D, Nurwigha R (2013) Mutu Biopellet Dari Campuran Arang Dan Sabut Cangkang Sawit. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 23 (1):1-12.
- Başkent E (2023) Biyoekonomi: sürdürülebilir ormancılığın yeni uygulama mekanizması mı?. *ArtGRID-Journal of Architecture Engineering and Fine Arts*, 5(1): 85-99.
- Bilgin S, Koçer A, Yılmaz H, Acar M, Dok M (2016) Çay fabrikası atıklarının peletlenmesi ve pelet fiziksel özelliklerinin belirlenmesi. *JAFAG* 33:70-80.
- Callejón-Ferreira AJ, Velázquez-Martín B, López-Martínez JA, Manzano-Agugliaro F (2011) Greenhouse crop residues: energy potential and models for the prediction of their higher heating value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:948–955.
- Cui X, Yang J, Wang Z, Shi X (2021) Better use of bioenergy: a critical review of co-pelletizing for biofuel manufacturing. *Carbon Capture Science & Technology*, 1:100005.
- Duranay N, Yılgin M (2018) Kısa analiz verileri kullanılarak biyokütlenin üst ısı değeri hesaplanması. *APJES*, 6 (2): 103–108.
- García R, Pizarro C, Lavín AG, Bueno JL (2014) Spanish Biofuels Heating Value Estimation. Part II: Proximate Analysis Data. *Fuel*, 117: 1139-1147.
- URL-1 <https://bepa.enerji.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 25.02.2025.
- Ismail AS, Osman N, Patric DO (2022) Trial of biopellet prepared by Napier grass. *ACS Omega*, 7(50): 46037-46050.
- Korkmaz AA (2022) Farklı linyitlerin kısa ve elementel analiz verilerine dayanarak üst ısı değerlerinin hesaplanması. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (1):49-60.
- Küsek G, Güngör C, Öztürk HH, Akdemir Ş (2015) Tarımsal artıklardan biyopelet üretimi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29 (2):137-145.
- Mawardi I, Razali M, Zuhaimi Z, Ibrahim A, Akadir Z, Razak H, Syarif J (2023) Characteristics of hybrid biopellet based on oil palm wood and natural activated charcoal as a renewable alternative energy source. *Journal of Ecological Engineering*, 24(9):80-91.
- Munawar SS, Subiyanto B (2014) Characterization of biomass pellet made from solid waste oil palm industry. *Procedia Environmental Sciences*, 20:336-341.
- Orta Anadolu Mobilya, Kâğıt ve Orman Ürünleri İhracatçıları Birliği (OMKO) (2022) Orman Ürünleri Sektörü için Amerika Pazarına Giriş Rehberi. 34.
- Özyüğür A, Yaman S, Küçükbayrak S (2018) Prediction of calorific value of biomass based on elemental analysis. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(03): 254-260.
- Parikha J, Channiwalab SA, Ghosal GK (2005) A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84:487-494.
- Racero-Galaraga D, Rhenals-Julio JD, German SS, Mendoza JM, Silvera AB (2024) Proximate analysis in biomass: standards, applications and key characteristics. *Results in Chemistry*, 12:101886.
- Saraçoğlu N (2002) Biyokütlenin enerji üretiminde değerlendirilmesi. 501-507.
- Sukarta IN, Sastrawidana IDK, Ayuni NPS (2018) Proximate analysis and calorific value of pellets in biosolid combined with wood waste biomass. *Journal of Ecological Engineering*, 19(3):185-190.
- Sungur B, Topaloglu B (2018) Pelet yakıtlı kazanda duman borularının yanma performansına etkisinin nümerik incelenmesi. 14th International Combustion Symposium (INCOS2018), 400-405.
- Taşar Ş (2021) Biyokütle kaynaklarının proximate bileşimleri ile üst ısı değerleri arasında yeni bir denklem geliştirilmesi ve denklemin başarısının araştırılması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 22(1): 42-51.
- Toksoy D, Çolak S, Bayramoğlu MM (2020) A study on the biomass energy potential of Turkey: example of wood pellets. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5(5): 867-871.
- Tolay M (2017) Ülkemizin Orman ve Tarımsal Biyokütle Potansiyeli: Türkiye’de Termik Santraller. *TMMOB*, 668:147-157, Ankara.
- Türkoğlu T, Gökoğlu C (2017) Kızılçam ormanları hasat artıklarından yapılan odun peletinin yakıt özelliklerinin belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1): 58-63.
- Ulusoy H, Atılgan A, Peker H (2016) Orman ürünleri endüstrisinin ekolojik açıdan irdelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1):92-106.
- Ünver S, Acar HH (2005) Odun hammaddesi üretim çalışmalarının odun kalite sınıfları üzerine olan etkileri. *Kafkas Üniversitesi Artvin Orman Fakültesi Dergisi*, 6 (1-2): 128-134.
- Yeşilkaya M, Çabuk Y, Karayılmazlar S (2022) TOPSIS-VİKOR yöntemleriyle Türkiye’deki illerin endüstriyel odun üretimi analizi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(3): 476-487.
- Yıldız Z (2024) Biyopelet ve Biyopelet Standartları. *Yaz Yayınları*. 1-17.
- Yıldız Z, Topkoç E (2023) Biyopeletlerin kısa analiz ve elementel analiz sonuçlarına göre üst ısı değerlerinin hesaplanması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 24 (1): 37-45.
- Yin CY (2011) Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, 90:1128–1132.
- Zengin Y, Çelik AE, Dok M, Çolak S (2020) Kavak odun atıklarından elde edilen peletlerin bazı yakıt özelliklerinin belirlenmesi. *AÇÜ Orman Fak Dergisi*, 21(1):29-36.