



SAHA KOŞULLARINDA DEPOLANAN BİYOKÜTLE YAKITLARINDA OLUŞAN KURU MADDE KAYIPLARININ İNCELENMESİ

Anıl BADEM^{*1}, Prof. Dr. Hayati OLGUN²

¹Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji Teknolojisi, İzmir,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-9492-9819>

²Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir,
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-1777-2010>

Anahtar kelimeler

Öz

*Biyokütle, Depolama,
Kuru Madde Kaybı, Nem
İçeriği, Yakıt Kalitesi,
Enerji İçeriği*

Biyokütleden enerji üretiminde, girdi maliyetlerinin en yüksek biyokütleden enerji üretiminde, girdi maliyetlerinin en yüksek parametresi lojistik operasyonlardan kaynaklanmaktadır. Mevsimsel tedarik koşulları ele alınarak karakterize edildiğinde biyokütle lojistiğindeki en önemli konu depolama süreçleridir. Heterojen yapısı nedeniyle katı biyokütlenin uygun bir şekilde depolanması ve efektif yakılması, fosil yakıtlarla mukayese edildiğinde çok daha zor ve sorunlu olabilmektedir. Depolama sürecinde biyokütle enerjisinde ciddi kayıplar oluşabileceği için uygun depolama şartlarının belirlenmesinin önemi açıktır. Yakıtın kullanıma uygun olarak saklanabilmesi hem teknik hem de ekonomik açıdan hayati bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada; 13 aylık periyotta ve farklı iklim koşullarında 5 farklı biyokütle hammaddesinin (saz kamışı, mısır sapı, çam kapağı, kavak kapağı, ağaç kökü) açık alanda depolanmasının hammadde bazında karakterizasyonu, nem içeriği, enerji içeriği, kuru madde kaybı ve kül miktarı değişimleri incelenmiştir.

Silolarda ürün bazında deney başlangıcında yapılan ilk tartım ve son tartım arasında oluşan fark üzerinden hesaplanan toplam kuru madde kayıpları; kavak kapağında %38, mısır sapında %35, çam kapağında %32, ağaç kökünde %25 saz kamışında ise %11 oranında çıkmıştır. Toplam kuru madde kaybı içeriğinde, nemden kaynaklı kuru madde kaybı %92 ile en yüksek ağaç kökünde, mikrobiyolojik bozulmadan kaynaklı kuru madde kaybı oranı ise %86 ile en yüksek mısır sapında gerçekleşmiştir.

* anilbadem@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1241446

INVESTIGATION OF DRY MATERIAL LOSSES IN BIOMASS FUELS STORED UNDER FIELD CONDITIONS

Keywords

Biomass, Storage, Dry Matter Loss, Moisture Content, Fuel Quality, Energy Content

Abstract

In energy production from biomass, the highest parameter of input costs arises from logistics operations. When characterized by considering seasonal supply conditions, the most important issue in biomass logistics is storage processes. Due to its heterogeneous nature, proper storage and effective combustion of solid biomass can be much more difficult and problematic compared to fossil fuels. The importance of determining the appropriate storage conditions is obvious, as serious losses in biomass energy may occur during the storage process. Storing the fuel suitable for use is of vital importance, both technically and economically.

In this study, the characterization, moisture content, energy content, dry matter loss and ash content changes of the open storage of 5 different biomass raw materials (reed cane, cornstalk, pine, poplar, tree root) in different climatic conditions over a 13-month period were investigated statistically.

Total dry matter losses calculated based on the difference between the first weighing and the last weighing at the beginning of the test based on the product in the silos are 38% for poplar cover, 35% for corn stalk, 32% for pine cover, 25% for tree roots and 11% for reed cane. In the total dry matter loss content, the highest dry matter loss rate due to moisture was in the tree root with 92%, and the dry matter loss rate due to microbiological degradation was the highest in corn straw with 86%.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 24.01.2023

Kabul Tarihi : 24.07.2023

Research Article

Submission Date : 24.01.2023

Accepted Date : 24.07.2023

Extended Abstract

Introduction and Objectives

Biomass fuels are very diverse, and each type shows different physical and chemical properties. Considering the elemental analysis, even the same biomass types in different regions may differ from each other. Since biomass is a fuel with organic content, its properties are highly dependent on weather, climate, growing conditions and soil properties. Due to this heterogeneous structure, proper storage and effective combustion of solid biomass can be much more difficult and problematic when compared to fossil fuels. The importance of determining suitable storage conditions is obvious, as serious losses may occur in biomass energy during the storage process. Storing the fuel suitable for use is of vital importance both technically and economically. Its economy is mainly determined by the moisture content and calorific value of the fuel. The high moisture content of the fuel reduces its calorific value. Moist fuel also reduces boiler efficiency because it consumes heat to evaporate the water in it during combustion.

In this study, the storage process and variables will be examined, and it will guide the determination of fuel supply and strategy according to the characteristics of storage loss in line with the statistical data on storage. Thus, more effective use will be provided economically and technically.

Methodology and Analysis

In this study, a test silo area was created in April 2020 in the open stock area of a biomass power plant in Afyonkarahisar city for storage experiments. 5 different biomass test silos, 4 seasons, 56 moisture samples, 5 different biomass raw materials belonging to 3 different periods, a total of 15 fuel characteristic analysis evaluations and energy change, dry matter loss, moisture change, energy and ash content were examined in the light of statistical data.

Results and Discussions

Due to the heterogeneous nature of biomass raw materials, there is uncertainty in terms of raw material characterization, and a clear correlation with seasonal conditions could not be found. The results of variation in ash content, gross calorific value, net calorific value, and energy content have large natural variations and clear identification and diagnosis can be misleading due to the heterogeneous material structure of biomass. While the ash content generally tended to increase at different rates, a decrease was observed in the reed. On the other hand, it is predicted that changes in moisture content, dry matter losses and dry matter losses due to microbiological decomposition will reach serious levels and affect biomass plants economically in long-term storage processes. Total dry matter losses, calculated as the difference between the first weighing and the last weighing based on the product, in the silos are 38% for poplar cap, 35% for corn stalk, 32% for pine cover, 25% for tree root and 11% for reed cane, from large to small. The percentages of moisture-related loss in total dry matter loss are 92% for tree root, 73% for poplar cover, 70% for reed cane, 32% for pine cover, and 14% for corn straw. The microbiological degradation rate in the total dry matter loss is 86% for corn stalk, 68% for pine cover, 30% for reed cane, 27% for poplar cover, and 7% for tree root. While the highest rate of total dry matter loss is in the poplar cover raw material, the microbiological degradation rate is the lowest. The product with the highest rate of microbiological degradation is corn stalk.

1. Giriş ve Amaç

Sanayileşme ve nüfus artışı beraberinde artan enerji talebini ortaya çıkarmıştır. Fosil yakıtlar dünyanın enerji arzında en büyük paya sahiptir ve özellikle çevre kirliliği ve küresel ısınma olmak üzere mevcut çevre sorunlarına neden olmaktadır. Enerji üretiminde fosil yakıtların yaygın olarak kullanılması ve bu yakıt rezervlerinin ömrünün sınırlı olması ile tüm dünyada yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan eğilim artmıştır (Kurnuç Seyhan ve Badem, 2021). Küresel ölçekte enerji gereksinimi, üretim giderlerinin minimize edilmesi ve çevre bilinci oluşturularak karşılanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik olması enerji üretimi için son derece önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan biyokütle, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak alternatif bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır (Gürdil, Baz, Ç.Demirel ve B.Demirel, 2015).

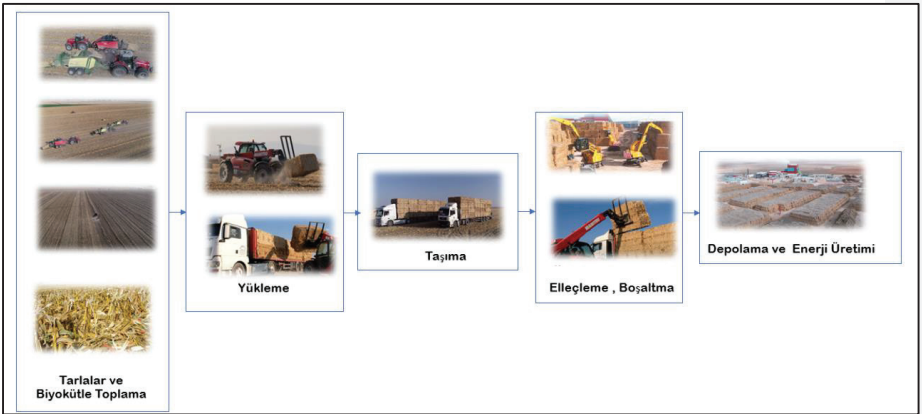
Biyokütle, bitkisel ve hayvansal kökenli organik bir malzeme olarak yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Doğrudan yakılabilir veya yakıt olarak kullanılabilen sıvı biyoyakıtlara veya biyogaza dönüştürülebilir (US Energy Information Administration, 2021). Biyokütle enerji proseslerinde ortaya çıkan CO₂, fotosentez yoluyla organik maddelerin büyümesi ve gelişmesi sırasında atmosferden alınan karbondioksit eşdeğer olduğundan biyokütle enerjisi karbon nötrdür (Ar, 2018a). Bu yüzden biyokütle enerjisinin CO₂ salınımının azaltılmasında ve dolayısıyla küresel ısınma ile mücadelede çok önemli bir rolü vardır. Bunun yanı sıra kullanılabilirlik ve çok iyi bilinen dönüşüm teknolojileriyle biyokütle, çok yakın bir zamanda enerji talebini ve enerji arz güvenliğini sağlamak için önemli enerji kaynaklarından biri olacaktır (L.Ekpeni, Benyoinis, F.Ekpeni, Stokis ve Olabi, 2014).

Enerji arzında biyokütle kullanımının artmasının önündeki en önemli engellerden biri tedarik zincirinin maliyeti ve biyokütleyi faydalı enerji biçimlerine dönüştürme teknolojisidir. Çoğu biyokütle türü, yılın belirli dönemlerinde hasat edildikleri için mevsimsel mevcudiyeti ile karakterize edilmektedir. Ancak son kullanıcı, tesisinde genellikle yıl boyunca sabit bir yakıt tedariki gereksinimi duymaktadır. Bu nedenle de hammaddenin depolanması gerekir (Rentizelas, Tolis ve Tatsiopoulos, 2009). Depolama noktası; çiftlikte, ormanda, toplama noktasında, son kullanıcı tesisinde veya bir ara noktada bulunabilir. Biyokütle depolama; özellikle hammaddenin mevsimsel mevcudiyeti, daha gelişmiş depolama altyapısının gerekli olduğu durumlarda veya hatta depolama sırasındaki kuru madde kaybının önemli olduğu durumlarda, toplam biyokütle maliyetinin önemli bir yüzdesini oluşturabilir.

Biyokütlenin üretim noktasından bir enerji santraline tedarik edilmesi için gerekli faaliyetler şunlardır (Allen, Browne, Hunter, Boyd ve Palmer, 1998);

- Tarladan veya ormandan biyokütlenin toplanması,
- Biyokütlenin karayolu taşıma araçlarının kullanabileceği bir noktaya taşınabilmesi için tarla veya ormanda elleçleme ve taşıma işlemlerinin yapılması,
- Biyokütle hammaddelerini enerji santraline gönderebilmek üzere karayolu taşıma araçlarına yüklenmesi ve boşaltılması,
- Taşıma verimliliği ve taşınan miktarı artırmak amacıyla biyokütle hammaddelerinin işlenmesi (orman ürünlerinin parçalanarak çips haline getirilmesi, tarımsal atıkların yığın yoğunluğunu artırmak amacıyla balya formuna getirilerek sıkıştırılması vb.),,
- Elektrik santralinde, çiftlikte, ormanda, tarlada veya bir ara bölgede depolanmasıdır.

Birçok biyokütle türü, yılın sadece belirli dönemlerinde hasat edilmektedir. Ancak biyokütle enerji santralleri yıl boyunca hammadde gereksinimi duymaktadır. Mevsimsel koşullar altında süreç organize edilerek depolama yapılmaktadır. Şekil 1’de biyokütle tedarik zincirine ait görsel sunulmuştur.



Şekil 1. Genel Biyokütle Tedarik Zinciri

Biyokütle tedarik zincirini standart tedarik zincirlerinden ayıran çok çeşitli özellikleri vardır. Özellikle tarımsal biyokütle türleri genellikle mevsimsel erişilebilirlikleri ile tanımlanmaktadır. Tarımsal biyokütle türlerinin mevcut olduğu dönem son derece sınırlıdır. Mahsulün hasat dönemi, hava koşulları, tarlaların çiftçiler tarafından yeniden ekilme dönemine göre ciddi değişkenlikler sunarak kısıtlı bir süre zarfında tedarik etme zorunluluğu barındırmaktadır (Skoulou ve Zabaniotou, 2007).

Çoğu biyokütle türü nispeten düşük yığın yoğunluğuna sahiptir. Taşıma araçları, ağırlıktan ziyade taşınan hacimle sınırlandırıldığından, taşımacılıkta lojistik zorluklar ortaya çıkmaktadır. Biyokütlenin enerji içeriğinin hacimle değil, kuru malzeme ağırlığı ile ilişkili olması ve depolama gereksinimlerinin kullanılan biyokütlenin hacmiyle orantılı olarak artması nedeniyle lojistik sorunlar depolamaya kadar uzanmaktadır (Rentizelas, 2013).

Biyokütle tedarik zincirinin taşıma ve depolama aşamalarının verimliliğini artırmak için biyokütle bir ön işlemde geçirilir (örneğin ağaç dallarının talaş haline getirilmesi veya tarımsal atıkların balya formuna getirilmesi için şerit öbek halinde yığılması vb.) (Rentizelas, Tolis ve Tatsiopoulos, 2009). Bu durum, biyokütlenin yoğunluğunun artırılmasını sağlar. Bu işlem genellikle karayolu taşımacılığından önce gelir ve hasatla entegre edildiğinde çok daha ucuz maliyete neden olur. Biyokütleyi yoğunlaştırmanın ve gözenekliliği azaltmanın diğer yöntemleri peletleme, balyalama, briketleme veya demetlemedir (Huisman, 2003).

Biyokütle enerji santralleri genellikle tek çeşit ya da çok az sayıda alternatif biyokütle kaynağı kullanılarak işletilmektedir. Enerji santralının yıl boyunca işletilmesi isteniyorsa, çok yüksek miktarlarda biyokütlenin uzun bir süre boyunca depolanması gerekmektedir. Sınırlı zaman diliminde yüksek miktarda biyokütlenin toplanıp tedarik edilebilmesi için hem ekipman hem de iş gücü olmak üzere, önemli ölçüde mevsimsel kaynak ihtiyacı oluşur. Bu mevsimsel talep, kaynakların özellikle de depolama alanının yetersiz kullanımına yol açarken, bu kaynakları elde etme maliyetini de artırabilir. Yıl boyunca tedarik edilebilen biyokütlenin kullanılması halinde bu sorun çözümlenebilir. Fakat pratikte biyokütle genellikle mevsimsel limitlere dayalı bir tedarik ağına sahiptir. Bu nedenle maliyetleri minimize etmek ve mevsimselliği kontrol altına almak amacıyla alternatif biyokütle türleri kullanılmaktadır.

Biyokütle yakıtları çok çeşitlidir ve her bir türü farklı fiziksel ve kimyasal özellikler göstermektedir. Elementel analiz sonuçlarına bakıldığında, farklı bölgelerdeki aynı biyokütle türlerinin bile birbirinden farklılık gösterebildiği görülmüştür. Biyokütle organik içerikli bir yakıt olduğu için özellikleri de havaya, iklime, yetiştirme şartlarına ve toprak özelliklerine son derece bağlıdır. Bu heterojen yapısı nedeniyle katı biyokütlenin uygun bir şekilde depolanması ve efektif yakılması, fosil yakıtlarla mukayese edildiğinde çok daha zor ve sorunlu olabilmektedir. (Gavrilescu, 2008; Langer, 1990) Depolama sürecinde biyokütle enerjisinde ciddi kayıplar oluşabileceği için uygun depolama şartlarının belirlenmesinin önemi açıktır. Yakıtın kullanıma uygun olarak saklanabilmesi hem teknik hem de ekonomik açıdan hayati bir öneme sahiptir. Ekonomikliği, temelde yakıtın nem içeriği ve ısı değeri belirlemektedir. Yakıtın yüksek nem içeriği

ısl değerini düşürmektedir. Nemli yakıt, yanma esnasında bünyesindeki suyu buharlaştırmak için ısı harcaması nedeniyle kazan verimini de düşürmektedir (Yrjola, 2006).

Nem içeriği, numunenin su içeriğinin toplam ağırlığına oranıdır. Nem içeriği ayrıca ısl değeri de etkileyen ana parametredir (Stromberg, 2005). Birçok ham biyokütle ilk toplandığında genellikle (% 4-50) arasında değişen önemli bir nem içeriğine sahiptir. Çoğu odunsu ve tarımsal kalıntı biyokütle türü üst sınıra yakındır (Samuelsson, Burvall ve Jirjis, 2006). Depolama sonrasında biyokütlenin nem içeriği son kullanım için hammaddenin uygunluğunu belirler. Verimli bir yanma için hammaddenin kullanılmadan önce düşük nem seviyelerine kadar kuruması istenir. Akışkan yatakta biyokütle yakmada, nem seviyesi %40'lara kadar tolere edilebilirken diğer yakma tesislerinde izin verilen maksimum nem oranı çok daha düşüktür. Nem oranı ne kadar düşükse, enerji dönüştürme sistemlerinin verimliliği o kadar yüksek olur. Tüm tesislerde her zaman sistem tasarımına özgü bir üst yakıt nem eşiği vardır ve bu eşik değer üzerinde bu sistemler çalışmamaktadır (Huisman, 2003). Depolama sürecinde yüksek nem, su aktivitesini artırır, bu durum da artan mikrobiyal aktivite seviyelerine, dolayısıyla bozulmaya ve kuru madde kaybına yol açar. Öte yandan, %15'in altındaki nem seviyelerinin, anaerobik mikrobiyal aktiviteyi engellediği ve biyokütlenin uzun süreli güvenli bir şekilde depolanmasına izin verdiği de bilinmektedir (Chaoui ve Eckhoff, 2014).

Biyokütlenin nem içeriğini azaltmak için kurutma işlemi yapılmaktadır. Kurutma işlemi sonunda ürünün nemi mikrobiyal büyümeyi veya diğer biyolojik reaksiyonları sınırlayacak ve durduracak düzeye indirilerek ürün bozulmadan uzun süre saklanabilmesine imkan sağlayacaktır (Acar vd., 2021).

Birçok biyokütle türü yanıcı maddelerdir ve bu nedenle büyük miktarlarda depolanırken önlemler alınmalıdır. Nem azaldığında yanıcılık artmaktadır. Bununla birlikte, kendi kendine ısınma daha az nemli bir niş noktada başlayıp depolama yığınının geri kalanına yayılabileceğinden, artan nem mutlaka güven verici bir faktör değildir (Van Loo ve Koppejan, 2012). Biyokütlenin kendiliğinden ısınması biyolojik ve kimyasal süreçler nedeniyle gerçekleşmektedir. Sürekli havalandırma uygulanmadığı takdirde %25'in üzerindeki nemlerde kendiliğinden ısınma meydana gelebilmektedir (Huisman, 2003).

Taze talaş veya ağaç kabuğu depolanırken, ilk günlerde yığının iç kısmındaki sıcaklık 60oC'ye kadar ulaşabilir. Hammadde yığın yüksekliğini sınırlayarak veya yığın boyunca havanın doğal taşınımını sağlayarak kendi kendine tutuşmayı önlemek mümkün olabilir (Van Loo ve Koppejan, 2012).

Kuru odun tozu ayrıca patlayıcıdır. Odun peleti imalatında, nakliyesine, teslim alınmasında, depolanmasında ve biyokütle enerji santrali tesislerinde birkaç

büyük yangın ve patlama meydana gelmiştir (Huescar vd., 2013). Bir ateşleme kaynağı olduğunda patlayıcı yakıt hava ile gerekli konsantrasyonda karıştığında ve karışım bir kap veya yapı içerisinde hapsedildiğinde bir patlama meydana gelebilir. Tutuşma kaynaklarının her zaman açık olmadığını bilmek gerekir. Örneğin; tutuşturma kaynağının depolama alanında çalışan biyokütle tekerlekli yükleyicinin olduğu bir toz patlaması vakası rapor edilmiştir (Hedlund, Astad ve Nichols, 2014).

Biyokütle depolamayla ilgili sorunlar yalnızca yangın ve patlama tehlikesi ile ilgili değildir. Hasat edilen biyokütle nem içeriğinin %20'den fazla olması, kendi kendine ısınmanın yanı sıra mantar ve spor oluşumuna da yol açabilir. Solunması halinde ciddi bir sağlık tehlikesi oluşturabileceğinden hijyen sorunlarına da neden olabilir (Forest Research, Biomass Energy Centre, 2022).

Biyokütle enerji santrallerinin durmasına veya verimsiz çalışmasına sebep olan biyokütle kullanımına bağlı özel sorunlara karşı önlem alabilmenin yolu, yakıt depolama süreçlerinden başlayarak kül tahliyesine kadar devam eden süreçlerin bütünsel olarak iyice anlaşılmasına bağlıdır. Biyokütle yakma tesislerinde başarılı, etkin ve verimli yakma çalışmaları için yakıt tedarikinin, depolama noktalarından başlayarak her aşamanın bilinçli bir şekilde yönetilmesi çok önemlidir.

Biyokütle enerji santrallerinde, yakıtların depolanmasında birçok değişken söz konusudur. Mevcut yerin meteorolojik değişkenliği, depolama süresi, yakıtların karakteristik özellikleri gibi pek çok değişken söz konusudur. Depolama şartlarının iyileştirilmesi yakıt kaybını azaltacağı için çok önemlidir. Büyük depolama kapasitelerinde açıkta depolama genelde uygulanmaktadır. Depolama süreci ve değişkenlerin incelendiği bu çalışma; yakıt tedariki ve stratejisinin belirlenmesinde yol gösterici olacaktır. Böylelikle mevcut potansiyelin daha ekonomik olarak kullanımını sağlanmış olacaktır.

Bu çalışmanın amacı, saha koşullarında depolanan biyokütle yakıtlarının kuru madde kayıplarını incelemektir. Biyokütle yakıtları, enerji üretimi için önemli bir kaynak olup sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ancak, bu yakıtların depolanması sürecinde çeşitli faktörlerden dolayı kuru madde kayıpları meydana gelmektedir. Bu kayıplar hem enerji verimliliğini azaltmakta hem de ekonomik açıdan kaynak israfına neden olmaktadır. Bu nedenle, saha koşullarında depolanan biyokütle yakıtlarının kuru madde kayıplarını anlamak ve azaltmak büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın ana hatları, kuru madde kayıplarının nedenlerini, miktarını ve etkilerini belirlemek, depolama koşullarını optimize etmek ve daha sürdürülebilir bir biyokütle enerji üretimi sağlamak için stratejiler geliştirmektir. Bu amaçla, çeşitli biyokütle türleri ve depolama yöntemleri üzerinde deneysel çalışmalar

yürütülmüş, veriler analiz edilerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu çalışma ile biyokütle yakıt endüstrisine ve enerji sektörüne faydalı bilgiler sağlanarak sürdürülebilir enerji üretimi hedeflerine katkıda bulunulması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metod

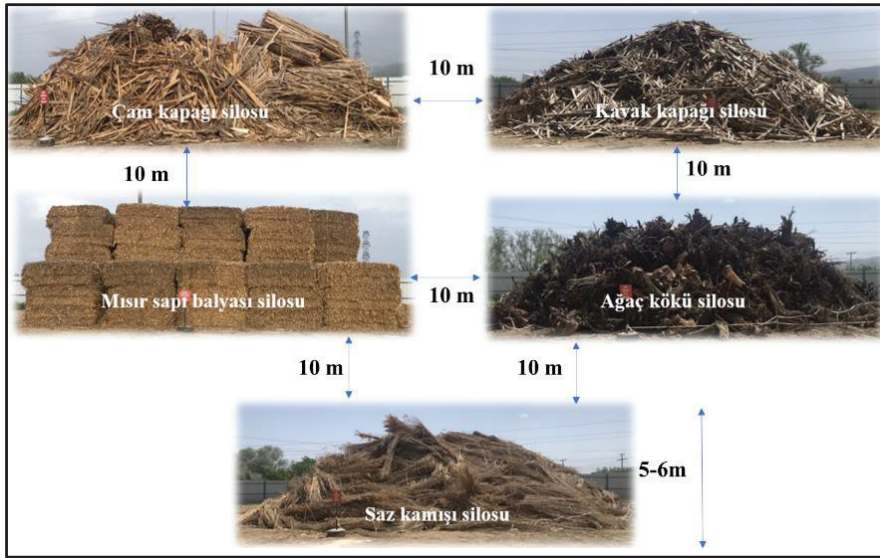
Biyokütle hammaddelerinin depolanmasında, açık hava depolama şekli en düşük maliyetli seçenektir ve bu nedenle literatürde verilen biyokütle tedarik zinciri modellemelerinin yanı sıra pratikte de yaygın olarak kullanılmaktadır (Hamelinck, Suurs ve Faaij, 2005). Açık havada depolama genellikle sahada gerçekleştirilir ancak bazı durumlarda biyokütle enerji santrali çevresinde de gerçekleştirilebilir (Allen, Browne, Hunter, Boyd ve Palmer, 1998; Cundiff, Dias ve Sherali, 1997). Mevsimselliğin hammadde lojistiği üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak ve enerji üretim faaliyetlerinin operasyonel sürecini uzatmak için birden fazla mevsimsel biyokütle kaynağı kullanılmaktadır. Biyokütlenin nihai kullanımının, hammadde arzının potansiyel kesintisinden ayrılmasını sağlamak için son kullanıcı konumunda emniyet stoğu olarak bir miktar hammadde depolanmasına her zaman ihtiyaç olacaktır. Örneğin bir biyokütle tesisi tüm hava koşullarında çalışabilmelidir ve bu durum ancak son kullanıcı lokasyonunda yeterli hammadde stoğu varsa sağlanabilir. Depolama sadece hammaddeyi stoklamak için değil, aynı zamanda malzeme karakteristiği ve kalite bozulmasını azaltmak için onu belirli koşullar altında tutmak için de gereklidir. (Huisman, Venturi ve Molenaar, 1997; Sokhansanj, Kumar ve Turhollow, 2006).

2.1 Biyokütle Yakıtları

Bu çalışmada, depolama deneyleri için 2020 yılı Nisan ayında Afyonkarahisar'da bulunan bir biyokütle enerji santrali açık hava stok sahasında, test siloları alanı oluşturulmuştur. Oluşturulan alanlarda kantarda ilk tartımlar gerçekleştirilerek 114.260 kg çam kapağı, 115.780 kg kavak kapağı, 57.620 kg mısır sapı balyası, 38.320 kg saz kamışı ve 106.700 kg ağaç kökü ürün bazında ayrı ayrı Şekil 2'de gösterilen formda depolanmıştır. Silolar, aralarında 10 m boşluk olacak şekilde 5-6 m yükseklikte yan yana olarak hazırlanmıştır. Tablo-1'de depolama deneylerinde kullanılan biyokütlelerin türü, atık türevi ve tedarikçi bilgileri verilmiştir.

Tablo 1. Biyokütle Türleri, Atık Türü ve Tedarikçi Bilgileri

Biyokütle Türü	Biyokütle Atık Türü	Tedarikçiler
Çam Kapağı	Orman Endüstrisi Atıkları	Orman İşletmeleri, Ağaç İşleme Sanayi
Kavak Kapağı	Orman Endüstrisi Atıkları	Orman İşletmeleri, Ağaç İşleme Sanayi
Ağaç Kökü	Orman Temizliği Atıkları	Orman İşletmeleri, Peyzaj Firmaları
Mısır Sapı	Tarımsal Atıklar	Tarım İşletmeleri, Mısır Üreticileri, Çiftçiler
Saz Kamışı	Sulak Alan Temizliği/ Tarımsal Atıklar	Sulak alan işletmeleri, Doğal koruma dernekleri, Çiftçiler



Şekil 2. Test Silosu Yerleşimleri

Şekil-2’de gösterilen biyokütle hammaddelerinden çam kapağı ve kavak kapağı; ilgili ağaç gövdelerinin ormanda hasat edildikten sonra kereste atölyelerinde işlenerek inşaatlık kereste imalatından arta kalan kapağı atıklarından oluşmaktadır. Tanelik mısır hasadı yapıldıktan sonra mısır sapı anızları yerde kalır. Çiftçiler, toprağı bir sonraki yılın mahsulü için hazırlamak amacıyla anızların en kısa sürede yerden kaldırılması ile ilgilenmektedir. Anızların enerji üretiminde değerlendirildi-

rilmesi için toplama işleminde yaygın olarak prizmatik ve rulo balya makineleri kullanılır. Nakliyede kullanılan kamyon kapasitesinden daha fazla yararlanmak amacıyla farklı boyutlarda balya üretimi gerçekleştirilmektedir. Yerde kalan mısır sapı anızlarının balya makineleri vasıtası ile 240*90*120 ölçülerde prizmatik şekilde balya formuna getirilerek Şekil-2'de gösterilen şekilde silolanmıştır. Endüstriyel orman kesim alanlarında kesim sonrasında kalan ağaç kökleri iş makineleri vasıtasıyla sökülerek, Şekil-2'de gösterilen şekilde biyokütle enerji santralinde hammadde olarak kullanılmak üzere test silosuna nakledilmiştir. Saz kamışı ile ilgili en önemli dezavantaj hasat süresinin nispeten kısa olmasıdır. Sürenin kısıtlı olmasının iki nedeni vardır. Hasat araçlarının biçim esnasında neden olduğu hasar riskini minimuma indirmek amacıyla sulak alan zeminin kuru olması gerekmektedir. Diğer taraftan kuş türleri, omurgasızlar, sürüngenler başta olmak üzere bütün habitat bileşenlerinin üreme, beslenme, barınma ve göç dönemleri dikkate alınmalıdır. Sulak alan yönetim planına uygun dönemde, çiftçiler tarafından hasat edilerek getirilen saz kamışları Şekil-2'de gösterilen şekilde silolanmıştır.

2.2 Karakterizasyon ve Deneylein Yapılışı

5 ayrı ürün bazında oluşturulan test silolarında 2020 yılı Nisan ayı itibari ile haftalık olarak nem ölçümü gerçekleştirilmiştir. Nem ölçümü prosesinde her bir silonun, beş farklı noktadan numuneler alınarak öncesinde LOYKA LKD 100 numune öğütücü kırıcı değirmende 0,5-1,5 mm boyutunda öğütülerek homojenlik sağlanmış ardından AND MX-50 nem tayin cihazında ölçümleri gerçekleştirilerek kayıt altına alınmıştır. AND MX-50, ısıtma ve kurutmadan önce ve sonra bir numunenin ağırlığını karşılaştıran ısıtma ve kurutma yöntemini kullanan, %0,01 ölçüm hassasiyetine sahip nem analiz cihazıdır.

Nem ölçümleri, 2020 yılı Nisan ayından 2021 yılı Nisan ayına kadar haftalık periyotta ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Hava durumunun nem ve yakıt kalitesi üzerine olan mevsimsel etkisini incelemek amacıyla Afyonkarahisar meteoroloji il müdürlüğünden ilgili ölçüm periyodu aralığındaki 13 aylık süre zarfına ait meteoroloji verileri alınmıştır. Meteoroloji verilerinde, hava sıcaklığı °C, bağıl nem %, yağış miktarı ise (kg/m²) olarak alınmıştır.

Biyokütlenin hammadde karakterizasyonu, enerji içeriğinin belirlenmesi ve depolama süreci içerisindeki değişimini yorumlamak amacıyla her bir silodan alınan numuneler Tablo 2'de belirtilen yöntemle analizlerin yapılması amacıyla akredite bir laboratuvara gönderilmiştir. İlk depolamaya Nisan 2020'de başlanmıştır. Nisan 2020, Ekim 2020 ve Nisan 2021'de ayrı ayrı yeni numuneler alınarak analizler yapılmıştır.

5 ayrı biyokütle test silosunda bulunan hammaddeler (çam kapağı, kavak kapağı, ağaç kökü, mısır sapı, saz kamışı) 13 ay boyunca Nisan 2020-Nisan 2021 tarihleri arasında, haftalık periyotta (56 hafta) ve ürün bazında 56 ayrı nem ölçümü gerçekleştirilmiştir. 5 farklı biyokütle hammaddesi için ayrı ayrı 3 farklı döneme

ait (Nisan 2020, Ekim 2020, Nisan 2021) toplamda 15 yakıt için bu analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Yakıt Analizleri ve Yöntemleri

ANALİZLER	BİRİM	YÖNTEM
Kül	%	EN 14774 – 3:2009 E
Nem	%	EN 14775 – 2009 E
Uçucu madde	%	EN 15148 – 2009 E
Toplam kükürt	%	ASTMD 4239 – 18
Alt ısııl değer	cal/g	EN 14918 – 2009 E
Üst ısııl değer	cal/g	EN 14918 – 2009 E
C, H, O	%	CEN/TS 15104: 2005 (E)
Cl	%	EPA 5050 İyon Kromatografisi
O	%	EN 15296
Kül ergime sıcaklığı	°C	ASTM D 1857/D 1857 M-18

C: karbon, H: hidrojen, O: oksijen, Cl: klor

Çalışma kapsamında incelenen biyokütle atıklarının depolama sonucu oluşan kuru madde kaybını anlamak amacıyla çeşitli analizler yapılmıştır. Bu analizler, kül analizi, nem analizi, uçucu madde analizi, toplam kükürt analizi, alt ısııl değer analizi, üst ısııl değer analizi, C, H, O, Cl analizleri ve kül ergime sıcaklığı analizini içermektedir. Deneylerde, ilgili standart yöntemler (EN ve ASTM gibi) referans alınarak ilerlenmiştir. Numuneler, önceden belirlenen numune alma prosedürüne göre temin edilmiştir. Analizler için uygun numune hazırlama teknikleri kullanılarak numuneler işlenmiştir. Her bir analiz yöntemi için uygun cihazlar ve ekipmanlar kullanılmış ve analizler önceden belirlenen parametrelerle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve elde edilen verilerin güvenilirliği doğrulanmıştır. Deneylerin yapılışı, analizlerin standartizasyonu ve tekrarlanabilirliği sağlamak amacıyla titizlikle planlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, biyokütle atıklarının depolama koşullarının optimize edilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik bilimsel temele katkı sağlamaktadır.

Deneylerin yapılışı sürecinde, öncelikle belirlenen biyokütle atıklarının numuneleri dikkatlice toplanmıştır. Numune alma işlemi, belirli bir temsiliyeti sağlamak ve güvenilir sonuçlar elde etmek için standart prosedürlere göre gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, numuneler laboratuvara getirilerek analizlere tabi tutulmuştur.

Analizlerin yapılması için ilgili standart yöntemler (EN ve ASTM gibi) referans

alınmıştır. Her analiz için uygun örnekleme ve numune hazırlama teknikleri kullanılarak numuneler işlenmiştir. Örneğin, kül analizi için numuneler, yüksek sıcaklıkta yakılarak organik maddelerin yanması sağlanmış ve geriye kalan kül miktarı ölçülmüştür. Nem analizi için numuneler ise belirli bir sıcaklıkta kurutulularak su kaybı hesaplanmıştır. Benzer şekilde, diğer analizler için de numuneler uygun yöntemlerle işlenmiş ve ölçümler yapılmıştır. Analizler için kullanılan cihazlar ve ekipmanlar, doğru ve hassas sonuçlar elde etmek için kalibre edilmiş ve uygun koşullarda kullanılmıştır. Her bir analiz parametresi, önceden belirlenen standartlara uygun olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve güvenilirliği doğrulanmıştır.

Deneylerin yapılışı aşamasında gösterilen özen ve doğruluk, elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve analizlerin bilimsel geçerliliğini sağlamaktadır. Bu analizlerin sonuçları, biyokütle atıklarının depolama sürecinde oluşan kuru madde kaybının anlaşılmasına ve gelecekteki enerji üretimi ve biyokütle yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1 Biyokütle Nem İçeriğinin Zamanla Değişimi

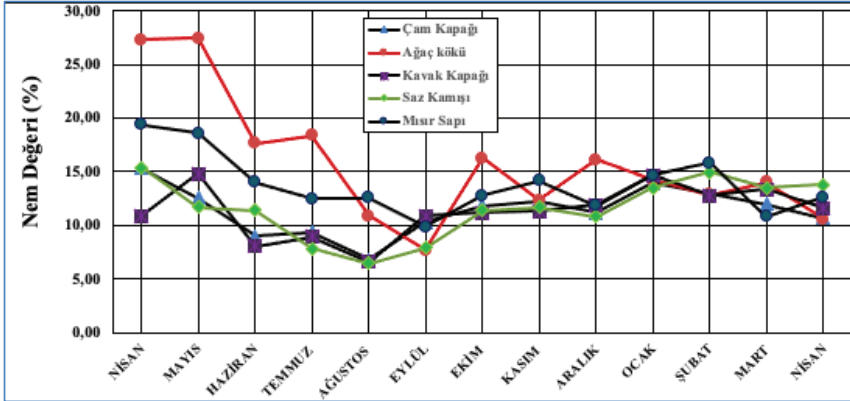
Nem içeriği, bir biyokütle örneğinde bulunan su miktarını ifade etmektedir. Bu su miktarı, biyokütlenin toplam kütlesine oranla ifade edilir. Nem içeriği genellikle yüzde (%) cinsinden ifade edilir. Biyokütle nem içeriği sınıflandırılması toplam nem, bağlı nem, serbest nem ve olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir. Toplam nem, bir biyokütle örneğindeki tüm su miktarını ifade eder. Bu, biyokütlenin içindeki serbest nem ve bağlı nem dahil olmak üzere tüm suyu kapsar. Serbest nem, biyokütlenin içerisinde serbest halde bulunan su miktarını ifade eder. Bu su, biyokütle örneğinin dış yüzeyinde veya içindeki boşluklarda bulunabilir. Bağlı nem, biyokütlenin içinde kimyasal veya fiziksel bağlarla tutulan su miktarını ifade eder. Bu su, biyokütlenin hücreleri veya dokuları içinde yer almaktadır (Kutlu, 2016). Nem içeriği sınıflandırması, biyokütle yakıtlarının depolanması, işlenmesi ve enerji üretimi gibi süreçlerde nemin etkilerini anlamak için önemlidir. Bu sınıflandırmalar, nem içeriğinin belirlenmesi ve analiz edilmesiyle ilgili çalışmalarda yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada yapılan ölçüm ve değerlendirmeler biyokütlenin toplam nem içeriği üzerinden verilmiştir.

Afyonkarahisar'da bulunan biyokütle enerji santrali açık stok sahasında Nisan 2020 tarihinde 5 ayrı test silosu oluşturulmuştur. Bu kapsamda oluşturulan test silolarında, biyokütle bazında başlangıç toplam nem değerleri;

- %15 ağırlıklı ortalama nem değeri ile 114260 kg çam kapağı,
- %10,9 ağırlıklı ortalama nem değeri ile 115780 kg kavak kapağı,
- %27,3 ağırlıklı ortalama nem değeri ile 106700 kg ağaç kökü,

- %15,4 ağırlıklı ortalama nem değeri ile 38320 kg saz kamışı,
- %19,4 ağırlıklı ortalama nem değeri ile 57620 kg mısır sapı balyası

şeklinde kayıt altına alınmıştır. Nisan 2020-Nisan 2021 tarihleri arasında (yaklaşık 13 aylık periyotta) haftalık olarak nem ölçümleri gerçekleştirilerek hammadde-lerin uzun süreli depolama işlemlerinde meydana gelecek nemden kaynaklı kütle kaybı incelenmiştir. Şekil 3'te Nisan 2020 - Nisan 2021 tarihleri arasında aylık ortalama hammadde bazında nem değerleri değişimi grafiksel olarak verilmiştir. Silolarda bulunan biyokütle hammaddelerinin nem içeriği, önemli ölçüde mevsime, depolama süresine ve ürün çeşidine bağlı değişmiştir. Depolama süresinin artması genel olarak nem içeriğinin düşmesine neden olmuştur. Kış aylarında buharlaşma, düşük hava sıcaklığı ve yüksek bağıl nem ile sınırlanırken, yazın sıcak ve kuru hava nem içeriğinde daha etkin bir düşüşe sebep olmaktadır (Hoffmann vd., 2017a).



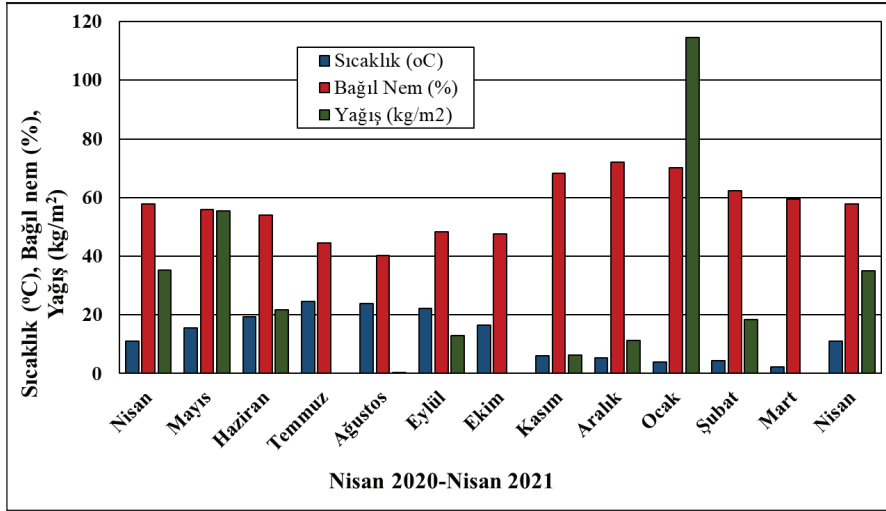
Şekil 3. Biyokütlerin Aylık Ortalama Toplam Nem Miktarı Değişimleri

Şekil 3'ten de görüleceği üzere 114.260 kg çam kapağının %15,31 ortalama nemi depolama sonunda %10,68'e düşmüştür. 106.700 kg ağaç kökü depolama deneyi sonunda %27,33 ortalama nem değerinden % 10,62 nem değerine düşmüştür. 38.320 kg saz kamışının nemi %15,40'tan depolama sonunda %13,76'ya düşmüştür. 115.780 kg kavak kapağı en düşük başlangıç nemine sahip olup %10,98 nem değeri deney sonunda çok büyük bir değişime uğramamıştır. Süreç içerisinde yağmurlarının etkisi ile %14'lere kadar çıkan nem değeri kurutma periyodunun sonunda %11,59'lara inmiştir. 57.620 kg mısır sapı %19,40 ortalama nem değeri ile başlatılan depolama sonunda %12,62'e düşmüştür. Biyokütle siloları test sonu olan Nisan 2021 tarihinde ortalama %12-14 nem seviyelerine kadar kurumuştur. En hızlı kuruma en yüksek nem değerine sahip olan ağaç kökünde

meydana gelmiştir. Sonuç olarak; açık sahada doğal kurutma ile biyokütle hammaddelerini birçok biyokütle enerji santrali için kabul edilebilir nem içeriği kadar kurutmak mümkün olabilmektedir (<%35 nem içeriği) (Filbakk, Hoibo ve Nurmi, 2011). Depolama stabilitesi için, maksimum nem içeriği, literatüre göre %15 ile %30 arasındadır (Österreichisches Normungsinstitut, 1998; Kollmann, 1951).

3.2 Hava koşullarının Biyokütlenin Nem İçeriğine Etkisi

Test silolarının açık havada kurutulması prosesi; rüzgâr hızı, sıcaklık, nem ve yağış gibi meteorolojik verilerden çok etkilenmektedir. Bu nedenle bu etkileri inceleyebilmek üzere Meteoroloji Genel Müdürlüğüne bağlı 5. Bölge Müdürlüğünden Afyonkarahisar ili Çay ilçesinde kurulu bulunan Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (OMGİ) kayıtları temin edilmiştir. Nisan 2020 ve Nisan 2021 tarihi arasında sıcaklık (oC), bağıl nem (%) ve yağış miktarları (kg/m²) aylık ortalama veriler olarak Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Afyonkarahisar İli Çay ilçesi, Aylık Ortalama Sıcaklık (°C), Bağıl Nem (%) ve Yağış Değerleri (kg/m²)

Depolama çalışmalarının yürütüldüğü Nisan 2020 ve Nisan 2021 tarihleri arasında bağıl nem ortalama %56,85 olarak ölçüm sonuçlarından hesaplanmıştır. Bu tarihler aralığında günlük minimum değer 31 Temmuz 2020 tarihinde %11, günlük maksimum değer ise 6 Ocak 2021 tarihinde %91 olarak karşımıza çıkmıştır. Aylık ortalamalarda ise en yüksek bağıl nem Aralık 2020'de %72,1, en düşük bağıl nem ise Ağustos 2020'de %40,2 olarak hesaplanmıştır.

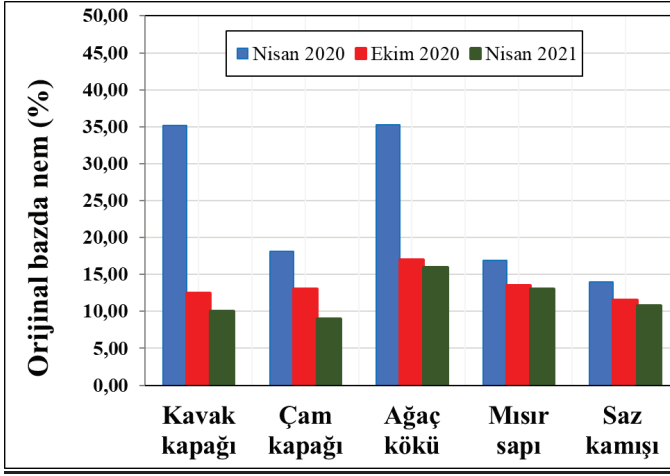
Depolama çalışmalarının yürütüldüğü Nisan 2020 ve Nisan 2021 tarihleri arasında ortalama sıcaklık değeri 12,75 °C olarak ölçüm sonuçlarından hesaplanmıştır. Aylık ortalama maksimum sıcaklık temmuz ayında 24,5 °C, aylık ortalama minimum sıcaklık ise mart ayında 2,3 °C'dir. Günlük ölçümlerde ise maksimum sıcaklık değeri 19 Temmuz 2020 tarihinde 36,2 °C, minimum sıcaklık değeri ise 18 Şubat 2021 tarihinde - 11,8 °C'dir.

Yağış miktarının aylara göre dağılımı incelendiğinde, ürünlerde oluşan nem değişimine paralel olduğu gözlemlenmiştir. Yağış miktarı, açık stok sahasında depolanan biyokütle hammaddelerinin nemi üzerinde artışa neden olmuştur. Hava sıcaklıklarının artması ile nem değeri düşmektedir. Aylık toplam yağış miktarı en fazla ocak ayında 114,6 kg/m² olmuştur. En düşük ise temmuz ayında olup (0 kg/m²) yağış meydana gelmemiştir. Günlük bazda yağış miktarı incelendiğinde ise 28 Ocak 2021 tarihinde 35 kg/m² günlük maksimum yağış miktarıdır.

Depolama çalışmalarının yürütüldüğü Nisan 2020 ve Nisan 2021 tarihleri arasında, ortalama 1,99 m/sn rüzgâr hızı oluşmuştur. Minimum ortalama rüzgâr hızı aralık ayında 1,3 m/sn, Maksimum ortalama rüzgâr hızı ocak ayında 2,6 m/sn olmuştur. Rüzgâr hızı ortalama değerleri 1,3 ila 2,6 m/sn arasında seyretmekte olup hafif rüzgârlı (1,6-3,3 m/sn) sınıfında yer almıştır. Rüzgar hızının ise açık alanda depolanan biyokütelerde başlangıçta nem kaybını hızlandırmada olumlu etki gösterdiği gözlemlenmiştir.

3.3 Biyokütelerin Karakterizasyonu

Detaylı hammadde karakterizasyonu için 5 ayrı biyokütle hammadde silosundan depolama çalışmalarının başlatıldığı Nisan 2020, ara dönem Ekim 2020 ve depolama çalışmalarının tamamlandığı Nisan 2021 döneminde örnek numuneler alınarak, kısa (proximate) ve elemental (ultimate) analizleri yapılmıştır. Şekil 5'te numunelerin 3 farklı döneme ait orijinal bazda nem içerikleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kavak ve ağaç kökü en yüksek başlangıç nemine sahip olup bunları çam, mısır sapı ve saz kamışı izlemiştir. Nisan 20-Ekim 20 döneminde malzemeler hızlı bir nem kaybına uğramış olup Ekim 2020-Nisan 2021 arasında ise kuruma hızı yavaşlamıştır. Kavak kapağı %35'ten %10'a kururken, çam kapağı %18'den %9'a, Ağaç kökü %35,23'ten %16'ya, Mısır sapı %16,9'dan %13'e, Saz kamışı ise %14'ten %10,76'ya kurumıştır.

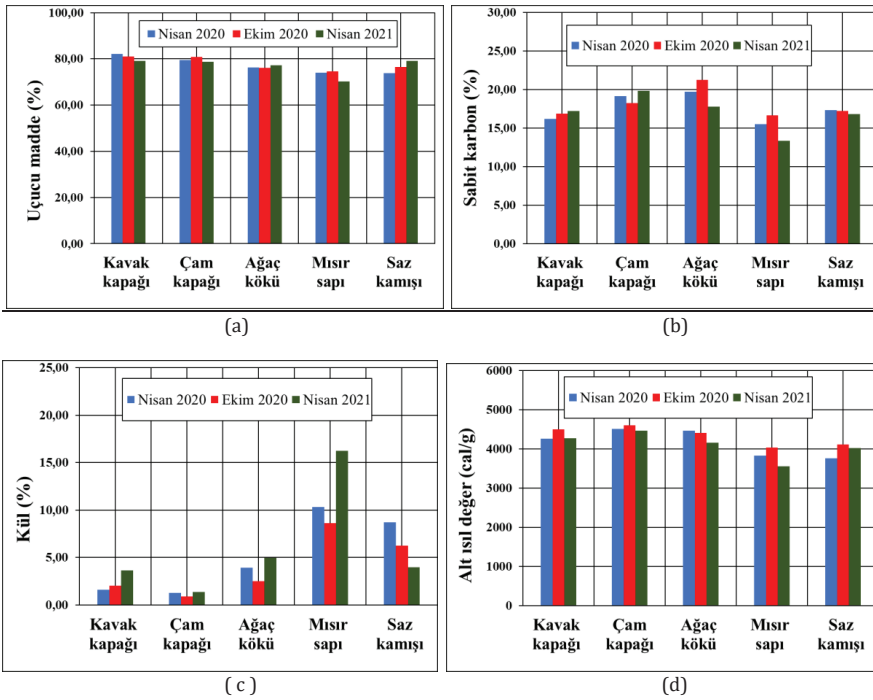


Şekil 5. Biyokütle Numunelerinin Nem İçeriği (ob)

Şekil 6'da 3 farklı zamanda (Nisan 2020, Ekim 2020 ve Nisan 2021) alınan örneklerin analiz sonuçları (uçucu madde, sabit karbon, kül ve alt ısıl değerleri) karşılaştırma yapabilmek amacıyla kuru bazda verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere tüm biyokütelerde kuru bazda hesaplanan uçucu madde yüzdesi ortalama % 70-80 aralığında (Şekil 8a), sabit karbon yüzdesi %14-21 aralığında (Şekil 8b), alt ısıl değeri 3900-4100 kcal/g (Şekil 8c) aralığında değişirken kül yüzdelerinde farklı değişiklikler meydana gelmiştir (Şekil 8d). En yüksek kül yüzdesi % 16 ile mısır sapında iken en düşük kül yüzdesi çam kapağında % 1 olarak çıkmıştır. İşletme koşulları nedeniyle bazen kül içeriği çok yüksek olabilmektedir. Örneğin; depolama alanından gelen taşlar ve kum, yollardan gelen toz ve ağaç kesme alanından gelen mineraller daha yüksek kül içeriğine katkıda bulunabilir. Atık odun gibi bazı yakıtlar, elleçleme ile ilgili olmayan büyük miktarda safsızlığa sahiptir (Thörnqvist, 1984). Kül içeriği genellikle uzun süre depolamadan sonra, kuru madde kayıpları nedeniyle nispeten daha yüksek olur. İnorganik külün ayrışmaması, ancak yakıtın bir kısmının ayrışması olağan bir sonuçtur. Depolama sırasında yakıtın uygun şekilde kullanılmaması nedeniyle kül içeriği de artabilir (Thörnqvist, 1985).

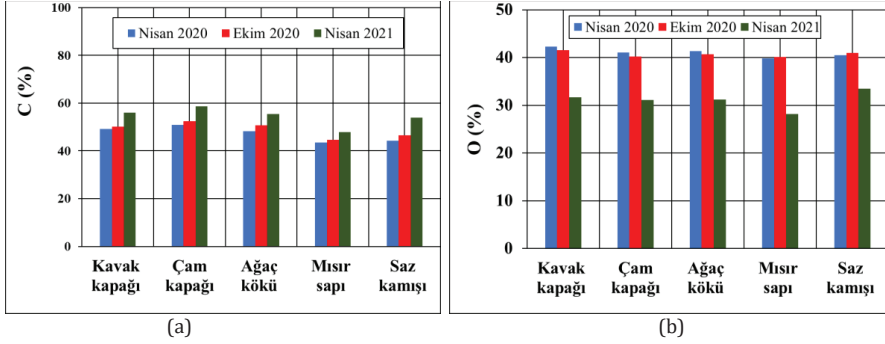
Uçucu madde değişimi; kavak kapağında Nisan 2020'de % 82'den Nisan 2021'de % 79'a düşerken sabit karbon yüzdesi % 16,22 den % 16,89 a yükselmiştir. Çam kapağında uçucu madde yüzdesi % 79,5 den % 78,7 ye düşerken sabit karbon yüzdesi % 19,14 den % 19,52 ye yükselmiştir. Ağaç kabuğunda uçucu madde yüzdesi % 76,26 dan % 77,18 e yükselirken sabit karbon değeri % 19,71 den % 17,79'a azalmıştır. Mısır sapında uçucu madde miktarı % 74,06'dan % 70,26'a azalırken sabit karbon miktarı da % 15,54'den % 13,36'a azalmıştır. Saz kamışı

şında ise uçucu madde miktarı % 73,81'den % 79,8'a artarken sabit karbon miktarı % 17,36'den % 16,83'e düşmüştür. Hem sabit karbon hem de uçucu madde miktarı kaybı en fazla mısır sapında meydana gelmiştir. Malzemelerin sabit karbon, uçucu madde ve kül miktarlarında depolama süresince kuru bazda meydana gelen bu değişim büyük ölçüde yakıtların kuruma periyodu boyunca yapılarının değişime uğradığını (bozulma) göstermektedir. Toplam kükürt oranı tüm yakıtlarda oldukça düşüktür. En yüksek kükürt yüzdesi saz kamışında olup % 0,11 mertebesindedir. Klor oranı ise mısır sapında % 0,264 ve saz kamışında ise % 0,249 olarak ölçülmüştür. Mısır sapı başta olmak üzere saz kamışının yakılmasında korozyon riski yüksek olacaktır.



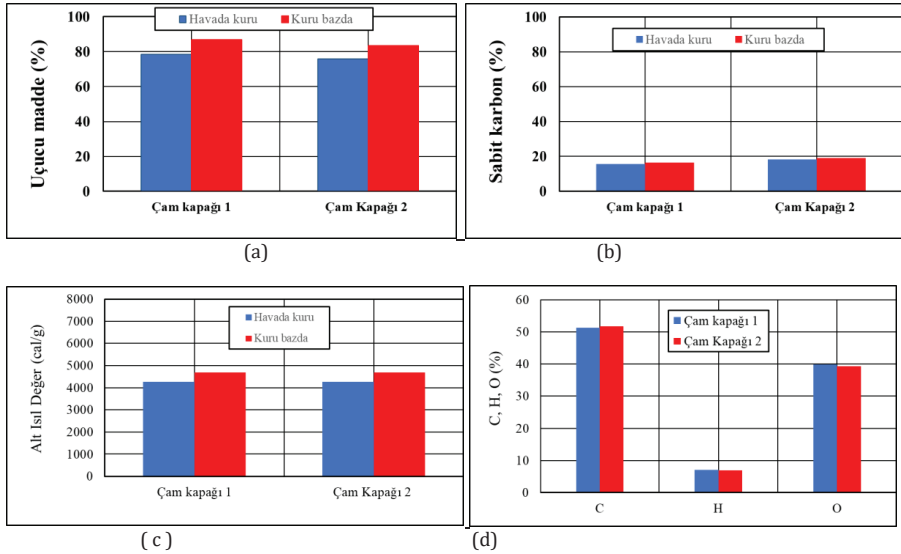
Şekil 6. Biyokütlelerin Kısa Analiz Sonuçları (kb)

Şekil 7 (a ve b)'de elemental analiz sonucu olarak karbon ve oksijendeki değişim verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi depolama sonunda karbon yüzdesi artarken oksijen yüzdesi tüm yakıtlarda düşmüştür. Bu durum biyolojik bozulmanın oksijen ile ilgili olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Biyokütlerin Elemental Analiz Sonuçları (a,b)

Biyokütle hammaddesi fosil yakıtlardan farklı olarak; yetiştirildiği iklim şartları, toprak yapısı, kullanılan tarım ilacı vb. dış etmenlerden son derece etkilenmektedir. Tarım sektöründe toprak güçlendiriciler bitkilerin gelişiminde anahtar rol üstlenmektedir (Taşkesen vd., 2022). Bu nedenle nem, yağış ve açık saha koşullarında depolamanın hammadde karakteristiği üzerine olan etkisini yorumlayabilmek amacıyla aynı çam kapağı silosuna ait 2 adet çam kapak numunesi eş zamanlı olarak analize gönderilmiştir. Şekil 8'de aynı zamanda (Nisan 2021) analize gönderilen aynı silodan alınan iki farklı çam kapağı örneğinin analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 8'a ve b'de uçucu madde ve sabit karbon değişimi havada kuru ve kuru baz olarak verilmiştir. Aynı zamanda aynı silonun farklı bölgelerinden alınan örneklerde çok az da olsa farklılıklar görülmüştür. Bu durum numunelerin eş zamanlı olarak homojen kurumadığını ve belli bölgelerde bir miktar bozulmanın olabildiğini göstermektedir. Elemental analiz ve ısıl değer analiz sonuçlarında bu fark çok daha az çıkmıştır. Aynı cins biyokütle hammaddesi aynı zaman diliminde numune alınarak analiz edilse dahi numuneden numuneye bir farklılık oluşmaktadır. Açık havada depolamanın hammadde karakterizasyonuna etkisi hususunda, biyokütlenin heterojen yapısı nedeniyle net bir korelasyon söylemek zordur.



Şekil 8. Aynı Silodan Alınan Çam Kapağı Numunelerinin (a) Uçucu Madde (%), (b) Sabit Karbon(%), (c) Alt Isıl Değer (cal/g) ve (d) C,H,O Analiz Sonuçları (2021-Nisan)

3.4 Kuru Madde Kayıpları

Nem içeriğine benzer şekilde kuru madde kaybı, depolama süresi, ürün çeşidi ve mevsime bağlıdır (Hoffmann vd., 2017b). Test silolarında bulunan biyokütle hammaddelerinin (çam kapağı, kavak kapağı, ağaç kökü, mısır sapı balyası, saz kamışı) kuru madde kayıpları Nisan 2020 – Nisan 2021 tarihleri arasında depolama öncesi ve sonrası şeklinde kantar tartımları üzerinden hesaplanmıştır. Ayrıca depolama sonrası gerçekleştirilen son tartım işleminde ağaç köklerinden arta kalan içeriğindeki topraklar silo zemininde ayrıca toplanarak tartılmış ve hesaplamalara dahil edilmiştir.

5 farklı biyokütle hammaddesine ait numunelerin ilk tartımları yapılarak giriş nem değerleri ölçülmüştür. Nisan 2020-Nisan 2021 tarihleri arasında gerçekleşen depolama periyodu sonunda stok çıkış nem değerleri ölçülmüştür. Hammadde bazında giriş nem değeri ve çıkış nem değeri arasındaki yüzdesel fark üzerinden, 2 No'lu formülde gösterilen şekilde nemden kaynaklı kuru madde kaybı hesaplanmıştır. Depolama deneyi sonrasında ürün bazında ayrı ayrı tartımlar gerçekleştirilerek ilk tartım ve son tartım arasında oluşan toplam kuru madde kaybı hesaplanmıştır. Toplam kuru madde kaybı ile nemden kaynaklı kuru madde kaybı arasındaki fark ise mikrobiyolojik bozunma kaynaklı kuru madde kaybını ifade etmektedir.

$$\text{Toplam Kuru Madde Kaybı} = \text{İlk Tartım} - \text{Son Tartım} \quad (1)$$

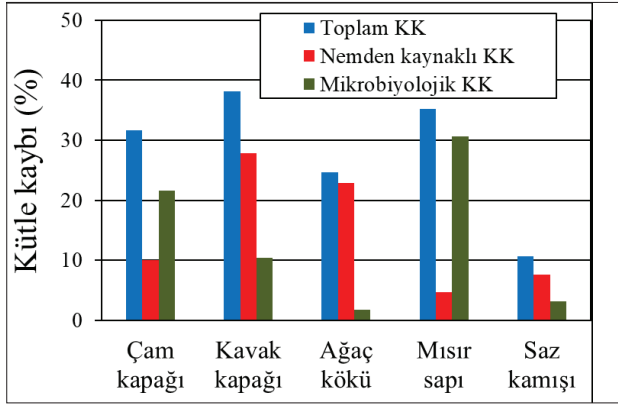
$$\text{Nemden Kaynaklı Kuru Mad. Kaybı} = \text{İlk Tartım (kg)} - \frac{(1 - \text{Giriş Nem Değeri}(\%))}{(1 - \text{Çıkış Nem Değeri}(\%))} \quad (2)$$

$$\text{Mikrobiyolojik Bozunma kaynaklı Kuru Madde Kaybı} = \text{Toplam Kur. Md. Kayb. (kg)} - \text{Nemden Kaynaklı Kur. Md. Kayb. (kg)} \quad (3)$$

Şekil 9’da biyokütle hammaddelerinin (çam kapağı, kavak kapağı, ağaç kökü, mısır sapı ve saz kamışı) depolama süresi boyunca yapılan tartım sonuçları üzerinden gerçekleştirilen hesaplamaları verilmiştir. Depolanan hammaddenin kuru madde kayıplarının ürün çeşidine göre farklılık göstermiş olduğu görülmektedir. Nem içeriği haricinde oluşan kaybın mikrobiyolojik bozunma kaynaklı kayıp olduğu düşünülmüştür.

Yakıt kalitesi ile ilgili hem kontrol edilebilir hem de kontrol edilemeyen faktörler vardır. Kontrol edilemeyen parametreler olarak yakıtların kuru yoğunluğu, kimyasal bileşimi, kalorifik değeri ve doğal kül içeriğinden bahsedilebilir. Nem içeriği, net ısıtma değeri, ince tanelerin dağılımı, mikrobiyal aktivite ve safsızlıklar taşıma ve depolama sırasında kontrol edilebilir parametrelere örnektir (Lehtikangas, 1998).

Şekil 9’dan en yüksek kuru madde kaybının; stok giriş nem değeri ortalamalarının diğer biyokütle hammaddelerine nazaran daha yüksek olması, mikrobiyolojik bozulmanın yoğun olduğu ve nemini çabuk kaybeden bir ürün olması nedeniyle %38 oranı ile kavak kapakta meydana gelmiştir. Kavak kapağını, mısır sapı ve çam kapak izlemiştir. Saz kamışında ise diğer biyokütle hammaddelerine nazaran çok daha düşük miktarda kuru madde kaybı meydana gelmiştir. Saz kamışı hem bünyesinde nem barındırmaması hem de hava koşullarından, diğer ürünlerle nazaran daha az etkilenmesi nedeniyle %11’lik bir kayıp söz konusudur. Saz kamışının birçok ülkede çatı malzemesi olarak kullanım gerekçelerinden biri de mukavemet ve hava koşullarından ciddi oranda etkilenmemesi olarak gösterilebilir.



Şekil 9. Biyokütle Bazında Toplam Kuru Madde Kaybı (%)

Mümkün olduğunca yakıtlar kuru formda depolamaya çalışılmalıdır, çünkü başlangıçtaki yüksek nem içeriği, mikrobiyal aktivite nedeniyle daha yüksek oranda kuru madde kaybı riskini artırmaktadır. Kuru malzeme, daha düşük nem içeriği nedeniyle taze malzemeye kıyasla daha düşük kuru madde kayıplarına sahip olacaktır (Bjorheden, Richardson ve Hakkila, 2002). Kuru madde kayıpları ile ilgili olarak, güvenli tarafta olmak için nem içeriği %20'nin altında olmalıdır. Kazan verimliliği açısından, yakıtta bir miktar nem olması iyi olabilir. Bu ekstra nem, yakmadan önce daha nemli yakıtla karıştırılarak elde edilebilir. Farklı türde ve farklı nem içeriğine sahip malzemelerin ayrı ayrı depolanması daha iyidir. Aksi takdirde, ısınma nedeniyle mikrobiyal aktivite yığın içerisindeki ısı geçişleri ve ısının dengelenme süreçleri ile başlayabilir (Thörnqvist, 1987). Literatürde birçok çalışma, kuru madde kayıplarının ilk haftalarda daha fazla olduğunu ve daha sonra depolama sırasında azaldığını göstermektedir (Thörnqvist ve Jirjis, 1990). Bu nedenle, depolamayı son giren ilk çıkar (LIFO: Last in First Out) ilkesine göre değerlendirmek iyi bir fikir ve avantajlı olabilir. Böylelikle her zaman ilk büyük kayıplardan kaçınılabilir. Malzeme bir süre depolanmış ise kayıp oranı genellikle daha düşüktür ve bu nedenle enerji açısından depolamak daha yeni ve taze malzemeye göre daha uygundur. Malzeme tesise varmadan önce başka yerlerde depolanmış olsa bile LIFO stratejisini uygulamak verimli olabilir. Malzeme tesise geldiğinde ve istiflendiğinde, mikrobiyal aktiviteyi ve yeni bir kuru madde kaybı döngüsünü başlatabilecek şekilde yığına yeni oksijen verilir (Wihersaari, 2005).

5. Sonuçlar

Bu çalışmada kapsamındaki araştırmalar göstermiştir ki açık saha koşullarında depolanan biyokütle hammaddeleri için; nem içeriğindeki değişiklikler ve kuru

madde kayıpları önemli ölçüde depolama süresine, mikrobiyolojik aktivitelere, mevsime, ürün çeşidine bağlıdır. 2020 Nisan – 2021 Nisan tarihleri arasında açık saha koşullarında, 5 farklı biyokütle hammaddesinin (çam kapağı, kavak kapağı, mısır sapı, saz kamışı) depolama deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ürünlere ilişkin Nisan 2020, Ekim 2020 ve Nisan 2021 dönemlerinde numuneler alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda hammadde karakterizasyonu, hava koşulları, kuru madde kayıpları, enerji içeriği ve kül içeriği konusu incelenmiştir.

Biyokütle hammaddelerinin heterojen yapısı nedeniyle depolama süresince hammadde karakterizasyonu açısından bir belirsizlik söz konusu olup, mevsimsel koşullara ilişkin net bir korelasyon söylemek zordur. Kül içeriğinde genel itibari ile bir artış eğilimindeyken saz kamışında çok az bir azalma görülmüştür. Diğer taraftan nem içeriğindeki değişimler, kuru madde kayıpları ve mikrobiyolojik bozunma kaynaklı kuru madde kayıpları ciddi seviyelere ulaşarak uzun vade depolama süreçlerinde biyokütle tesislerini ekonomik açıdan etkileyeceği öngörülmektedir.

Depolanan biyokütle hammaddelerinin Nisan 2020-Nisan 2021 periyodunda farklı oranlarda toplam kuru madde kaybı meydana gelmiştir. Toplam kuru madde kayıpları incelendiğinde, kayıpların bir kısmının nemden kaynaklı kalan kısmın ise mikrobiyolojik bozunma kaynaklı kayıplar olduğu görülmektedir. Silolarda ürün bazında ilk tartım ve son tartım arasında oluşan fark şeklinde hesaplanan toplam kuru madde kayıpları, kavak kapakta %38 ile en yüksek orana sahipken, saz kamışı %11 oranında en düşük kuru madde kaybına uğramıştır. Toplam kuru madde kaybı içerisindeki, nemden kaynaklı kayıp ağaç kökünde %92 ile en yüksek, mısır sapında ise %14 ile en düşük oranda gerçekleşmiştir. Toplam kuru madde kaybı içerisindeki mikrobiyolojik bozunma kaynaklı kayıp oranı ise %86 ile mısır sapında en yüksek, ağaç kökünde % 7 oranında en düşüktür. Toplam kuru madde kaybı miktarında en yüksek oran kavak kapak hammaddesinde iken, mikrobiyolojik bozunma oranı en düşüktür. Mikrobiyolojik bozunma oranı en yüksek ürün ise mısır sapıdır. Biyokütlenin yoğunlaştırılmasının kuru madde kaybını artırabileceği ve malzeme yüksek nem seviyesine sahipse sağlık ve güvenlikle ilgili riskleri artırmaktadır. Biyokütlenin sıkıştırılması, malzemenin daha az havalanması anlamına gelir. Bu durumda sıcaklıkta bir artışa ve gelişmiş mikrobiyal aktiviteye yol açar. Böylelikle kuru madde kaybının yanı sıra kendi kendine ısınma, mantar ve spor oluşumu tehlikesini artırır (Wilén, 2004). Bu nedenle balya formunda sıkıştırılarak depolanan mısır sapında en yüksek oranda mikrobiyolojik bozunma gözlemlenmiştir. Açık havada depolanan biyokütle hammaddelerinde kuru madde kayıplarını minimize edebilmek için;

- Başlangıçtaki yüksek nem içeriği, mikrobiyal aktivite nedeniyle daha yüksek oranda kuru madde kaybı riskini artırması nedeniyle mümkün olduğunca kuru hammadde depolamaya çalışılmalıdır. Kuru malzeme, daha düşük nem

içeriği nedeniyle taze malzemeye nazaran daha düşük kayıplara sahip olacaktır.

- Kuru madde kayıplarını en aza indirmek için, özellikle malzeme tazeyken, FIFO (First in First out) ilk giren ilk çıkar ilkesi yerine LİFO (Last in First out) son giren ilk çıkar ilkesine göre depolanmalıdır.
- Kuru madde kayıplarını azaltmak için malzemeyi mümkün olduğunca yakılma sürecine yakın bir zamanda parçalanmalıdır. Aksi takdirde yüzey alanının artması kuru madde kaybını hızlandıracaktır.
- Hammadde alımı yapılırken mümkünse uzun süre depoda beklemiş yakıtlar alınmaya çalışılmalıdır. En yüksek orandaki kayıpların halihazırda gerçekleşmiş olması ve daha kolay bozunan bileşiklerin tüketilmiş olması ihtimali vardır.
- Mikrobiyal aktivitelerin oluşmasını zorlaştıracak hava akışının kolay olduğu depolamalar yapılmalıdır.
- Siloları, genişliği yüksekliğinin iki katı olan uzun ipler halinde oluşturmaya çalışılmalıdır. Siloları genişletirken, daha geniş ve daha yüksek değil daha uzun yapmaya çalışılarak çevreden gelen soğutma etkisini en üst düzeye çıkarabilir ve hem kuru madde kayıplarını hem de kendiliğinden yanma riskini en aza indirebilmek mümkün olabilir.
- Yığın içerisinde kendiliğinden tutuşma riskini önlemek veya en aza indirmek için mümkün olduğunca homojen malzeme depolamaya çalışılmalıdır. Malzeme, yakıt türü, ürün boyutu, nem içeriği ve sıkıştırma derecesi açısından homojen olmalı ve farklı yakıtlar aynı silo içerisinde depolanmamalıdır. Tutuşma için katalizör görevi görebileceğinden yığınlar içerisindeki metal parçalardan kaçınılmalı ve yığındaki değişiklikler, sıcaklık gelişimi gözlemlenmelidir.

Kaynakça

- Acar, B., Dağdeviren, A., Janaani, A., Roshanaei, K., Taşkesen, E., Ongun, K. G., Özkaymak M. (2021). "Freeze - drying of carrot slices in diverse thicknesses", *International Journal of Energy Studies* 6(1);53-65
- Allen J, Browne M, Hunter A, Boyd J, Palmer H. (1998). Logistics management and costs of biomass fuel supply. *Int J Phys Distrib Logistics Manage* 28:463-77.
- Bjorheden, R., Richardson, J., Hakkila, P., (2002). Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice, *Kluwer Academic Publishers* Erişim Adresi: <http://site.ebrary.com/lib/slub/docDetail.action?docID=10052679>

- Chaoui, H., Eckhoff, S.R., (2014). Biomass feedstock storage for quantity and quality preservation. In: Shastri, Y., Hansen, A., Rodríguez, L., Ting, K.C. (Eds.), *Engineering and Science of Biomass Feedstock Production and Provision*. Springer, New York, NY.
- Cundiff, J.S., Dias, N., Sherali, H.D., (1997). A linear programming approach for designing a herbaceous biomass delivery system. *Bioresource Technology* 59 (1), 47-55.
- Ekpeni, L.E.N., Benyounis, K.Y., Ekpeni, F. N., Stokes, J. ve Olabi, A. G., (2014). Energy Diversity through Renewable Energy Source (RES) – A Case Study of Biomass. *Energy Procedia*, 61, 1740 –1747.
- Filbakk, T., Høibø, O., Nurmi, J., (2011). Modelling natural drying efficiency in covered and uncovered piles of whole broadleaf trees for energy use, *Biomass Bio-energ.* 35 (1) 454-463.
- Forest Research, Biomass Energy Centre., (2022) Erişim adresi: <http://www.biomassenergycentre.org.uk/>.
- Gavrilescu, D. (2008). Energy from biomass in pulp and paper mills. *Environmental Engineering and Management Journal*, 7 (5): 537-546.
- Gürdil G.A.K., Baz Y.Ö., Demirel Ç. ve Demirel Bç., (2015). Yakıt Peleti ve Briketi İçin Güncellenmiş Avrupa Birliği Standartları ve İlgili Parametreler. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29(2), 147-156.
- Hamelinck, C.N., Suurs, R.A.A., Faaij, A.P.C., (2005). International bioenergy transport costs and energy balance. *Biomass and Bioenergy* 29 (2), 114-134.
- Hedlund, F.H., Astad, J., Nichols, J., (2014). Inherent hazards, poor reporting and limited learning in the solid biomass energy sector: a case study of a wheel loader igniting wood dust, leading to fatal explosion at wood pellet manufacturer. *Biomass and Bioenergy* 66, 450-459.
- Hofmann, N. et al., (2017). Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions, *Biomass and Bioenergy*, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe>.
- Huéscar Medina, C., Phylaktou, H.N., Sattar, H., Andrews, G.E., Gibbs, B.M., (2013). The development of an experimental method for the determination of the minimum explosible concentration of biomass powders. *Biomass and Bioenergy* 53, 95-104.
- Huisman, W., Venturi, P., Molenaar, J., (1997). Costs of supply chains of *Miscanthus giganteus*. *Industrial Crops and Products* 6, 353-366.
- Huisman, W., (2003). *Optimising harvesting and storage systems for energy crops*

- in The Netherlands*. In: International Conference on Crop Harvesting and Processing, pp. 1-19.
- Kollmann, F., (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Erster Band: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit*, Springer, Berlin,
- Kurnuç Seyhan, A. & Badem, A. (2021). Erzincan ili hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik biyogaz tesisi senaryoları. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11 (1), 245-256 . doi: <http://dx.doi.org/10.17714/gumusfenbil.743724>
- Langer, K. (1990). Fluidized Bed Combustion in the Pulp and Paper Industry. Environmental Conference, *Tappi Proceedings*, pp. 207-218.
- Lehtikangas P., (1998). *Lagringshandbok för trädränslen*, Swedish University of Agricultural Sciences, Inst för virkeslära ISBN 91-576-55664-2
- Ottan Çöpten Enerji Dr. F. Figen AR Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi 143. Sayı. (2018). Erişim Adresi: <http://www.enerji-dunyasi.com/edergi/6/143/24/#zoom=z>
- Österreichisches Normungsinstitut, Hackgut für energetische Zwecke (1998). - Anforderungen und Prüfbestimmungen (M 7133), Wien
- Özben Kutlu (2016). *Biyokömürleştirme İçin Parabolik Güneş Yoğunlaştırıcı Sistem Tasarımı, Kurulumu ve Farklı Biyokütle Kaynakları İçin Optimum İşletme Koşullarının Belirlenmesi* (Doktora Tezi) Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Rentizelas, A., Tolis, A., Tatsiopoulou, I., (2009). Logistics issues of biomass: the storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (4), 887-894.
- Rentizelas, A., (2013). Biomass supply/process chain. In: Rosendahl, L. (Ed.), *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*. Woodhead Publishing Ltd.
- Samuelsson, R., Burvall, J., Jirjis, R., (2006). Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass. *Biomass and Bioenergy* 30 (11), 929-934.
- Skoulou V, Zabaniotou A. (2007). Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production. *Renew Sustain Energy Rev* 11:1698-719.
- Sokhansanj, S., Kumar, A., Turhollow, A., (2006). Development and implementati-

on of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL). *Biomass and Bioenergy* 30 (10), 838-847.

- Strömberg, B. (2005). Bränslehandboken, Handbook of fuel, *Värmeforsk*, ISSN 0282-3772
- Taşkesen E., Acar Ş., Arlı F., Dumrul H., Ertuğrul G., Bülbül Ş. ve Özcan E., (2022). “Şirnak-Uludere bölgesinde yaygın olarak bulunan asfaltitlerden doğal hümik asit elde edilebilirliğinin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 691-697,
- Thörnqvist, T., (1984). Hyggesrester som råvara för energiproduktion – Torkning, lagring, hantering och kvalitet, *Swedish University of Agricultural Sciences*, Dep. Of forest production, Report no 152
- Thörnqvist, T., (1985). Drying and storage of forest residues for energy production, *Swedish University of Agricultural Sciences*, Dep. Of forest production, Research note no 155, ISBN: 91-576-2438-0
- Thörnqvist, T., (1987). Spontaneous combustion in piles with comminuted wood fuel, *Swedish University of Agricultural Sciences*, Dep. Of forest production, Research note no 163, Inst. För vikeslära ISBN 91-576-3075-5
- Thörnqvist, T. and Jirjis, R., (1990). Bränsleflisens förändring över tiden – vid lagring i stora stackar, Changes in fuel chips during storage in large piles, *Swedish University of Agricultural Sciences*, Institutionen för virkeslära, Report no. 219, ISSN 0348-4599
- US Energy Information Administration. Erişim Adresi: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>
- Van Loo, S., Koppejan, J., (2012). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. Earthscan.
- Wihersaari M., (2005). “Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue” *Biomass and Bioenergy* 28 444–453
- Wilén, C., (2004). Review of waste processing technology for SRF
- Yrjöla, J. (2006). Modelling and Experimental Study on Wood Chips Boiler System with Fuel Drying and with Different Heat Exchangers. Doctoral Dissertation, *Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering Laboratory of Applied Thermodynamics*, Espoo, Finland, 69 pp.