



Kondenzasyonlu bir kereste kurutma fırınında hava hareket profilinin iyileştirilmesi

Hızır Volkan Görgün^{a,*} , Öner Ünsal^a 

Özet: Kerestenin kurutulması, kaliteli bir üretimde kaçınılmaz bir süreçtir. Günümüzde kurutma için kullanılan ve ortam şartları kontrol edilebilen kurutma fırınları bulunmaktadır. Ancak bu kontrol esnekliği, ortam şartlarındaki her değişkenle ilgili dikkati de beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada bu değişkenlerden hava hareket hızının tespiti, kurutmaya etkisi ve kurutmanın iyileştirilmesi için hava hareketini yönlendirmesi için yerleştirilen boşluk kapatma levhasının (panel) etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda yaklaşık 10 m³ meşe kerestesi, kondenzasyonlu bir kurutma fırınında yarı-otomatik kontrol sistemi ile kurutulmuştur. Kurutma sonrasında iki hol boşluğu referans alınarak kerestelerin rutubet içerikleri ve tüm fanlar açıkken toplam 42 bölgeden anemometre ile istif katları arasındaki hava hareket hızları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, panel konulmadan ideal kurutma şartlarından uzaklaştığı için, standartlardaki rutubet dağılımı kriterine göre düşük kalitede veya standart dışı kurutma yapıldığı belirlenmiştir. Panel ile yapılan müdahale ile hava hareket profilinin iyileştiği ve havanın istif katları arasında daha homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Panel konulmasına karşın sadece istif üst katlarında, literatürde de belirtilen bir sorun nedeniyle, hava hareket hızında yeterince iyileşme sağlanamamıştır. Bununla birlikte fırında ısıtma ve hava hareketi için sadece elektrik kullanıldığı için, farkındalık oluşturması açısından kurutma sırasında tüketilen elektrik enerjisi de ölçülmüş ve dış ortam sıcaklığıyla ilişkilendirilmiştir. Sonuçlar, tüketim verilerinin hava şartları değişimine bağlı olarak değişmediği tespit edilmiştir. Bu duruma fırın yalıtım performansının ve/veya fırının kapalı bir mekânda yer almasının etkili olduğu düşünülmektedir. Kurutmanın ikinci yarısında artan ortalama enerji tüketim miktarının, kurutma programında istenen daha şiddetli şartlar nedeniyle, kondenzasyon cihazının daha fazla devreye girmesinden kaynaklanmış olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Rutubet dağılımı, Hava hareket hızı, Anemometre, Enerji tüketimi

Determining and improving air movement profiles in a condensation type lumber drying kiln

Abstract: Drying of timber is an inevitable process in quality production. Today, there are drying kilns that their environmental conditions can be controlled. However, this control flexibility also brings with it attention to every variable in the environmental conditions. In this study, it was tried to determine the air movement speed of these variables, its effect on drying and the effect of the gap closing board (panel) placed to direct the air movement to improve drying conditions. In this context, approximately 10 m³ of oak lumber was dried in a dehumidifier (condensation) drying kiln with a semi-automatic control system. After drying, the moisture content of the lumbers were determined and the air movement speeds between the stack floors were measured with an anemometer from a total of 42 regions with all fans on, using two plenum chambers as a reference. The results obtained indicate that low quality or non-standard drying was carried out according to the moisture distribution criteria in the standards, as the ideal drying conditions were not achieved without installing the panel. It was determined that the air movement profile improved with the intervention made with the panel and the air was distributed more homogeneously between the stack floors. Despite the installation of panel, sufficient improvement in air movement speed could not be achieved only on the upper floors of the stack, due to a problem also mentioned in the literature. However, since only electricity is used for heating and air movement in the kiln, the electrical energy consumed during drying was also measured and correlated with the outdoor temperature in order to raise awareness. The results showed that consumption data did not change according to changes in weather conditions. It was thought that the kiln insulation performance and/or the kiln being located in a closed area were effective in this situation. It was concluded that the increased average energy consumption in the second half of drying might be according to the condensation device being activated more related to the more severe conditions required in the drying program.

Keywords: Moisture distribution, Air velocity, Anemometer, Energy consumption.

1. Giriş

Masif ağaç malzeme (kereste) tomruktan biçildikten sonra yaş halde (> %60 rutubet) bulunmaktadır. Ancak birçok kullanım yeri için %20 ve altındaki rutubet kademelerine kadar kurutulması gereklidir. Kereste kurutma işlemi için günümüzde ortam şartlarına müdahale edilerek daha hızlı,

kaliteli ve ekonomik kurutmalar yapılmasına imkân veren teknik kurutma fırınları kullanılmaktadır. Kereste kurutma fırınları, istifleme için sabit bir hacimsel boşluğa sahiptir. Ancak sadece bir firmada bile üretilen malzeme ölçüleri ve kereste istifleri çeşitlilik göstermesi nedeniyle, fırının istifleme kısmı çoğu zaman tamamen doldurulamamaktadır. Dikkat edilmediği takdirde özellikle hava hareketinin

✉ ^a İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34473, Sarıyer, İstanbul

✉ ^{*} **Corresponding author** (İletişim yazarı): volkan.gorgun@iuc.edu.tr

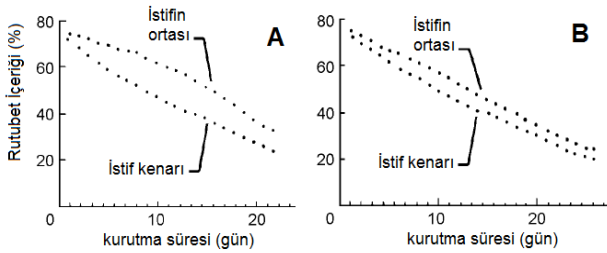
✓ **Received** (Geliş tarihi): 19.06.2023, **Accepted** (Kabul tarihi): 16.11.2023



Citation (Atıf): Görgün, H.V., Ünsal, Ö., 2023. Kondenzasyonlu bir kereste kurutma fırınında hava hareket profilinin iyileştirilmesi. Turkish Journal of Forestry, 24(4): 425-435. DOI: [10.18182/tjf.1317103](https://doi.org/10.18182/tjf.1317103)

düzensiz ve/veya yetersiz dağılımı nedeniyle, başta sonuç rutubeti dağılımı olmak üzere önemli sorunlara yol açmaktadır. Örneğin kereste rutubetinin %40'ın üstünde kurutma risklerini azaltmak için yavaşlatılan hava hareketi, kurutma süresini de ciddi oranda arttırmakta ve istif içerisindeki rutubet dağılımını da geniş bir aralığa taşımaktadır (Denig vd., 2000) (Şekil 1). Bu şekilde gerçekleştirilen bir kurutmada homojenliği sağlamak için denkleştirme periyodunun daha uzun süre uygulanması gerekmektedir (Ünsal, 2002). Ancak kurutma süresinin uzatılması kurutma ekonomisini olumsuz etkilemektedir. İdeal hava hareket hızı, ağaç türü, kereste kalınlığı ve kereste rutubetine göre değişmekle birlikte genel olarak 1 ila 4 m/s arasında olmalıdır (Kantay, 1993). Taze haldeki sert ağaçların ön kurutma işleminde dahi bir hava hareketi (0,3 – 0,7 m/sn) meydana getirilmelidir (Denig vd., 2000).

Uygun hava hareketinin sağlanması için fan ve istifleme düzeni olmak üzere iki ana bileşen bulunmaktadır. İstiflemede yer alan ağaç türü, kalınlığı, uzunluğuna göre uygun istif çıtası kalınlığı, çıtalama sıklıkları gibi değişkenler, hem kerestelerin kurutma sırasında deformasyon göstermemesi, hem de homojen hava hareketinin sağlanabilmesi için son derece önemlidir. Aksi takdirde ısı ve nem taşıyıcısı olan hava, istif katları arasında düzgün bir şekilde geçemeyeceğinden, yeterli kurutmayı sağlayamayacaktır.



Şekil 1. Hava hareket hızına göre istiflerdeki rutubet dağılımı (Hava hareket hızları; A: 1 m/sn, B: 2 m/sn) (Denig vd., 2000)

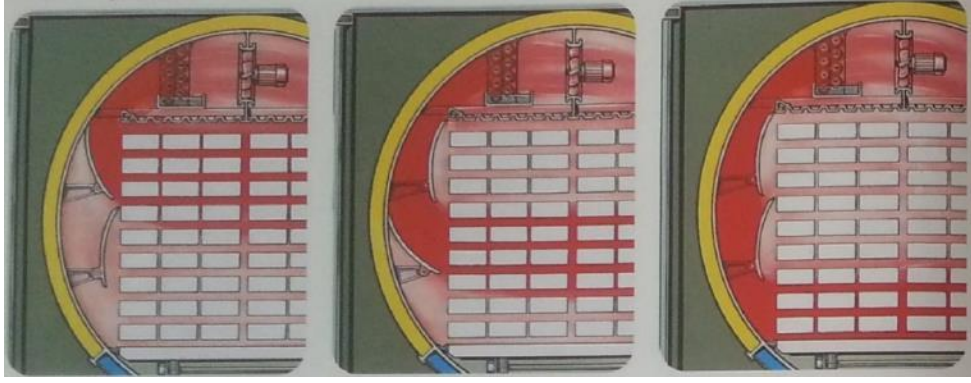
Fırın kurulumunda yeterli hava hareketi hesaplanarak seçilen ve yerleştirilen fanlar, ömrü boyunca sabit kalmaktadır. Sadece bazı yapılan çalışmalarda ve uygulamalarda, kurutmanın farklı aşamalarında farklı hava hareket hızlarını yakalayabilmek için devir sayısı ve çalışma yönü değiştirilebilmektedir (Steiner vd., 2011). Fan ve istifleme düzeni bileşenlerinin bir bileşkesi olarak oluşan hava hareketinin istif katları arasında uygun bir şekilde dağıtılması, kerestelerdeki rutubet homojenliğini doğrudan etkilemektedir. İstif hacmiyle fırın ekipmanı arasında boşluk bulunduğu takdirde, hava bu kısımları tercih ederek, istif katları arasındaki hareketi azalacaktır. Bu kapsamda fırın içerisinde sabit veya hareketli hava hareketi yönlendiricileri (İngilizce: baffle): İstiflerin üst kısmı ile ara tavan arasındaki boşluğun kapatılmasında, uzunluk yönünde fırın duvarı ve giriş kapısı arasında oluşan boşlukların kapatılmasında ve istiflerin alt kısmında oluşan boşluğun kapatılmasında kullanılmaktadır. Bazı fırın üreticileri, fırının duvarına ilave hava toplama kutusu ilave ederek, üst kısımda oluşturulan hava hareketini toplayıp, direkt alt kısma iletilmesini sağlamaktadır (SPIB, 2023). Ancak maliyetli olması ve yalıtımı etkileyebileceğinden, daha çok fırın içerisindeki müdahaleler tercih edilmektedir. Bazı pratik uygulamalarda bu boşlukları kapatmak için "boşluk kapatma levhası" kullanılmaktadır. Hem her kurutmada ilave iş yükü getirmesinden hem de nispeten yüksek oluşturulan istiflerde uygulanması zor olduğundan daha az tercih edilmektedir. Kurutma fırını üreticileri, bu tür levhaların yerine hava hareketini iyileştiren farklı müdahalelerde bulunabilmektedir. Bu kapsamda istif kenarları için dikey, istif üstü için yatay hareketli kanatçık sistemleri ilave edebilmektedir (Şekil 2 ve Şekil 3). Bu hareketli sistemler vakumlu fırınlarda da tercih edilebilmektedir (Şekil 4).



Şekil 2. İstif kenarları için dikey kanatçık örnekleri (Katres, 2022; SPIB, 2023)



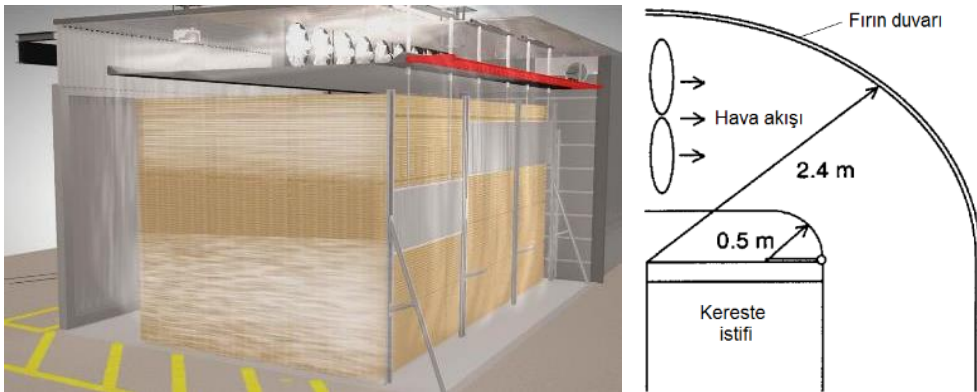
Şekil 3. İstif üstü için yatay kanatçık örnekleri (Katres, 2022)



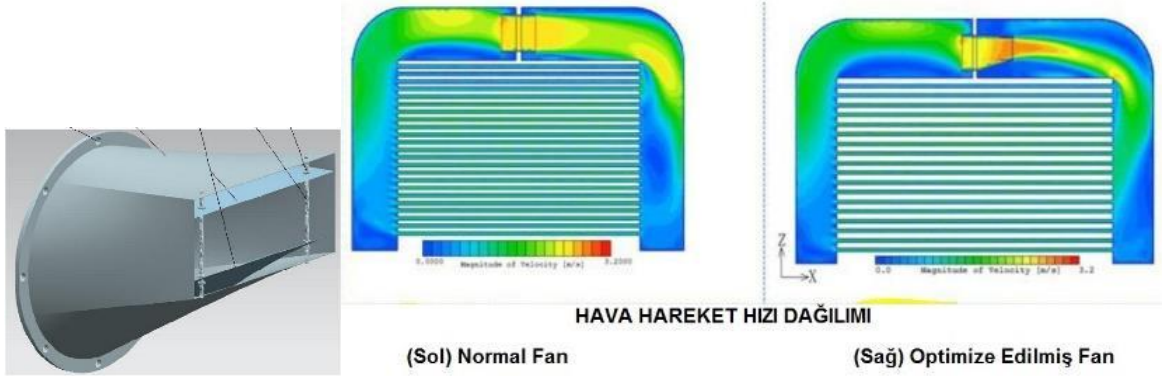
Şekil 4. Vakum fırında hareketli hava yönlendirici kullanımı

Nijdam ve Keey (2002), klasik fırınlarda fanlardan gelen hava hareketinin, oluşan sirkülasyon nedeniyle üst istif katlarında oluşmadığını belirterek, bunun için bir hava yönlendirici tasarımı önermiştir (Şekil 5, sağ). Sun vd. (2015) tarafından hem benzer bir sorun için, hem de fanlarda üretilen havanın, fırın duvarına çarptıktan sonra daha az enerji kaybına uğrayarak, istif katları arasında daha homojen dağılması amacıyla farklı bir tasarıma bir aparat geliştirilmiştir. Bu aparat fanların önüne konularak, üretilen havanın fana oranla kesit alanını azaltıp, enerjisini artırarak farklı şekilde yönlendirilmesi amaçlanmıştır (Şekil 6). Bunun dışında hava hareketini farklı istif katlarına odaklamak üzere çeşitli yöntemler de geliştirilmiştir. Brunner-Hildebrand firması (Almanya, 2023) düşey hareketli levhalar ile hava hareketini farklı istif katlarına yönlendirme yaptığını belirtmektedir (Şekil 5, sol). Bu tür çalışmalarda, mevcut durumun tespiti ve/veya yapılan değişikliği etkisinin tespit için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Ölçüm yöntemleri veya matematik modellerle hava hareket profillerinin tahmini ve/veya tespitiyle kurulumların iyileştirilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır (Langrish ve Keey, 1996; Sun vd., 2004; Zadin vd., 2015; Zdanski vd., 2015; Görgülü ve Aydın, 2023).

Kondenzasyonlu (nem yoğunlaşturmali) kurutma fırınlarının en önemli avantajı, dış ortamla hava değişimi olmadığından bir kazan sistemi olmadan çalışabilmeleridir (Milić vd. 2021). Özellikle düşük sıcaklık sayede renk değişimi riski azaldığı gibi, geleneksel fırınlara göre daha düşük kurutma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu nedenle Akmeşe gibi kaliteli kurutulması güç ağaç türlerinin, renk değişiminin istenmediği lamine parke üst katmanında kullanılan papellerinin vb. kurutulmasında tercih edilmektedir. Bununla birlikte olması gerekenden düşük hava hareket hızları oluştuğunda mantarla veya kimyasal reaksiyonlardan dolayı renklenme riski bulunduğundan (Koch, 2008) dikkat edilmesi gerekmektedir. Kondenzasyonlu fırınlarda tamamen kapalı hava dolanımı olduğundan, hava hareketinin yönetilmesi son derece önemlidir. Çünkü bu tür fırınlarda, fırın içerisinde ana hava hareketini sağlayan fanlarla birlikte, kondenzasyon cihazının kurutma için kullandığı fan(lar) ortak çalışmaktadır (Sun vd., 2004). Bu tip fırınlarda hava hareketi düzgün sağlanamadığı takdirde, kerestelerden alınan rutubetle bağlı nemi yükselen havanın, fırın içinde devamlı dolanımı sağlanacaktır. Böylece kurutmanın yavaşlaması, renklenme kusurunun oluşması gibi riskleri de beraberinde getirecektir.



Şekil 5. (Sol) Hava yönlendirme için düşey hareketli levha kullanımı (Brunner-Hildebrand, 2023), (Sağ) Üst istif katlarında hava hareketi sağlamak için yönlendirici tasarımı (Nijdam ve Keey, 2002)



Şekil 6. (Sol) İlave aparatla (Sağ) hava hareketinin yönlendirilmesi (Sun vd., 2015)

2. Materyal ve yöntem

Bu çalışma kapsamında lamine parke üst tabakası üretiminde kullanılacak 25 mm x 100 mm x 2000 mm ebatlarındaki toplam 10 m³ akmeşe (*Quercus alba* L.) kereste kullanılmıştır. Keresteler 15 mm kalınlığındaki çıtalarla tek istif oluşturacak şekilde istiflenmiştir. Çıtaların oluşturduğu %38'lik boşluk oranı ile tüm istif hacmi 16 m³'e (1,6 m yükseklik x 2,5 m genişlik x 4 m uzunluk) kadar çıkmıştır. Kerestelerde kurumaya bağlı bir deformasyon oluşmaması için, üstlerine ağırlıklar yerleştirilmiştir. Ara tavan ve kereste istifi arasındaki boşluğu kapatmak için kontrplaktan paneller kullanılmıştır (Şekil 7).

Kurutma denemeleri, 15m³ net kereste kapasiteli bir kondenzasyonlu kurutma fırınında yapılmıştır. Fırında bağıl nem ve sıcaklık kontrolünü referans alan yarı-otomatik kontrol sistemi bulunmaktadır. Bu sistemde fırın içerisindeki bağıl nem ve sıcaklık duyucular tarafından algılanmakta ve kontrol ünitesinden elle ayarlanan değerler, sistem tarafından otomatik olarak fırın içerisinde oluşturulmaktadır. Sıcaklık artırma ve bağıl nem düşürme müdahaleleri, fırın içerisinde bulunan kondenzasyon cihazıyla yapılmaktadır. Kondenzasyon cihazında da 35 cm çapında ve çalıştığı zaman 4 m/sn'ye ulaşan hava hareketi üreten bir fan bulunmaktadır. Ancak fırındaki ana hava hareketi, her biri 50 cm çapında, 0,75 kW motor gücünde ve motor devri 1360 m/dk olan üç adet fan (AGM80 4b, GAMAK, Türkiye) ile sağlanmaktadır. Tüm bu sisteme ilave olarak, ısıtma dâhil tüm sistemde elektrik enerjisi kullanıldığından, enerji tüketiminin ölçümü için elektrik sayacı da ilave edilmiştir (Şekil 8). Kurutma fırını bir atölye binası içerisinde bulunmasına karşın, enerji tüketiminin Aralık ayında dış ortam sıcaklığından etkilenme durumunun incelenmesi için, dış kaynaktan (Freemeteo, 2022) bölgesel meteorolojik veriler alınıp karşılaştırılmıştır.

Kurutulacak keresteler sonrasında parke yapımında değerlendirileceği için hedef sonuç rutubeti, ısıtılan iç mekanlarda tercih edilen rutubet oranlarından olan %9 (Welling vd., 2010) olarak tercih edilmiştir. Kurutma programı için WoodWizard 2 (Logica, 2022) yazılımının kütüphanesinde yer alan ve 25mm kalınlığında Akmeşe için önerilen kurutma programı referans alınmış olup, yarı-otomatik sistemde kereste rutubeti referans alınarak uygulanmıştır. Kurutma programı aşamaları arasındaki geçiş ise, kontrol panelindeki anlık sıcaklık ve bağıl nem verileri değiştirilerek uygulanmıştır. Fırında denge nemi duyucusu

bulunmadığından, sıcaklık ve bağıl nem verileri kullanılarak Simpson'ın (1973) çalışmasındaki tablodan denge nemi değerleri tespit edilmiştir.

Kereste rutubetleri, kurutma sırasında ve sonrasında olmak üzere iki farklı şekilde ölçülmüştür. Kurutma sırasındaki ölçümler TS EN 13183-2 (2012) standardına göre yapılmıştır. Bunun için fırın içerisinde farklı yerlerde bulunan beş adet keresteye vida şeklinde sensör çiftleri 32 mm aralıklarla ve kereste kalınlığının 1/3 derinliğine kadar yerleştirilmiştir. Kablolar aracılığıyla kontrol paneline aktarılan veriler, fırının dış kısmında ilave bir rutubet ölçer ile (Hydromette HT 65, Gann, Almanya) kurutma sırasında ölçülmüştür. Cihazın bu modelinde sıcaklık için en fazla 40°C'ye göre doğru ölçüm için ayar düğmesi bulunabilmesine karşın, daha yüksek sıcaklıklar için ilave bir düzeltme yapılmıştır. Kullanım kılavuzunda da belirtildiği gibi, ekranda okunan değerler her 10°C yüksek sıcaklık için %1 azaltılarak kaydedilmiştir. Kurutma sonunda ise kereste rutubetleri dielektrik prensibi metoduyla, TS EN 13183-3'e (2012) standardına göre, temas tipi rutubet ölçerle (Hydromette Compact A, Gann, Almanya) ölçülmüştür. Sonuç rutubetleri EDG (1994) ve TS EN 14298'deki (2017) kriterlere göre değerlendirilmiştir. Her iki standartta da her bir ölçülen kerestenin hedef sonuç rutubetine göre dağılım sınırları verilmişken, TS EN 14298'de (2017) bu dağılım sınırlarının ortalamada aşmaması gerektiği belirtilmiştir.

İstif katları arasındaki hava hareket hızı ölçümleri, kurutma sonunda ortam şartları 20°C sıcaklık ve 35% bağıl neme ayarlanarak, teleskobik sensöre sahip bir anemometre (Testo 435, Testo Sensor GmbH, Almanya) ile yapılmıştır. Şekil 9'un solunda görüldüğü gibi, ölçüm sırasında hava hareket hızının engellenmemesi için, sensörün teleskobik aparatı kullanılarak ölçüm pencerelerinden en az 1 m uzaktan ölçüm yapılmasına dikkat edilmiştir.

Ölçümler, istifin her iki kenarında 15 x 15 cm ebatlarındaki "ölçüm penceresi" olarak adlandırılan alanlarda yapılmıştır. Her bir ölçüm penceresinde, 3'er adet istif katı boşluğunda yapılan ölçümlerin ortalaması alınmıştır (Şekil 9). Her bir istif kenarında homojen ve eşit aralıklı olacak şekilde, yükseklikte 3, uzunlukta ise 7 olmak üzere toplamda 21 adet ölçüm penceresi belirlenmiştir. Ölçüm pencerelerinin yerleri belirlenirken hava hareketinin önemli ölçüde değiştiği yerler referans alınmıştır. Bunun için yükseklikte 50'şer cm'lik aralıklar, uzunluk yönünde ise, Şekil 10'da görüldüğü gibi fanlar ve fırının sınırları referans alınmıştır.



Şekil 7. İstifleme düzeni ve (Sağ hol boşluğundaki) istif üstünde boşluk kapatma levhası
*LHB ve RHB: (Sırasıyla) Sol ve sağ hol boşluğu, İK: İstif kenarı, Oklar: Hava hareket yönü



Şekil 8. Fırının iç (Sol ve Orta) ve dış (Sağ) ekipmanı

*Fırın içinde: A: Kondensasyon cihazı, B-C: (Sırasıyla) Sıcaklık-Bağıl nem sensörü, D ve F: (Sırasıyla) Fırın içi ve dış kereste rutubeti algılama, E: Fan, G-H: (Sırasıyla) Kondensasyon cihazı ve fanların elektrik panosu, I: Elektrik sayacı



Şekil 9. Ölçüm penceresinde hava hareket hızı ölçümü

Kapı-fan arası Genişlik 70cm		Fan Çapı: 50 cm		Fanlar arası mesafe: 80 cm		Fan Çapı: 50 cm		Fanlar arası mesafe: 80 cm		Fan Çapı: 50 cm		Duvar-fan arası: Genişlik 70cm	
Kapı-istif arası Genişlik: 35cm		Fan-istif arası: 80cm		Fan-istif arası: 80cm		Fan-istif arası: 80cm		Fan-istif arası: 80cm		İstif-duvar arası: Boşluk yok			
Kapı	Giriş koridoru	Fan Altı	Fanlar Arası	Fan Altı	Fanlar Arası	Fan Altı	Fanlar Arası	Fan Altı	Duvar Tarafı	Duvar			
	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi				
	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi	Ölçüm penceresi				

Şekil 10. Ölçüm pencerelerinin konumu ve ölçüler (Sağ hol boşluğundan görünüş)

2.1. Müdahale

Oluşturulan istif uzunluğu ve fırın uzunluğu aynı olmadığından, istifle giriş kapısı arasında ortalama 70 cm uzunluğunda bir boşluk oluşmuştur. Yapılan bazı ön ölçümlerde de bu kısımda önemli miktarda hava hareketi olması ve ölçüm pencerelerindeki değerlerde de önemli farklılık bulunduğu gözlemlendiği için bir müdahale yapılması ihtiyacı duyulmuştur. Bu nedenle yerden ara tavana kadar bu boşluğun kapatılması için ham (kaplamasız) yonga levhadan “dikey boşluk kapatma levhası” konulmuştur (Şekil 11).

3. Bulgular ve tartışma

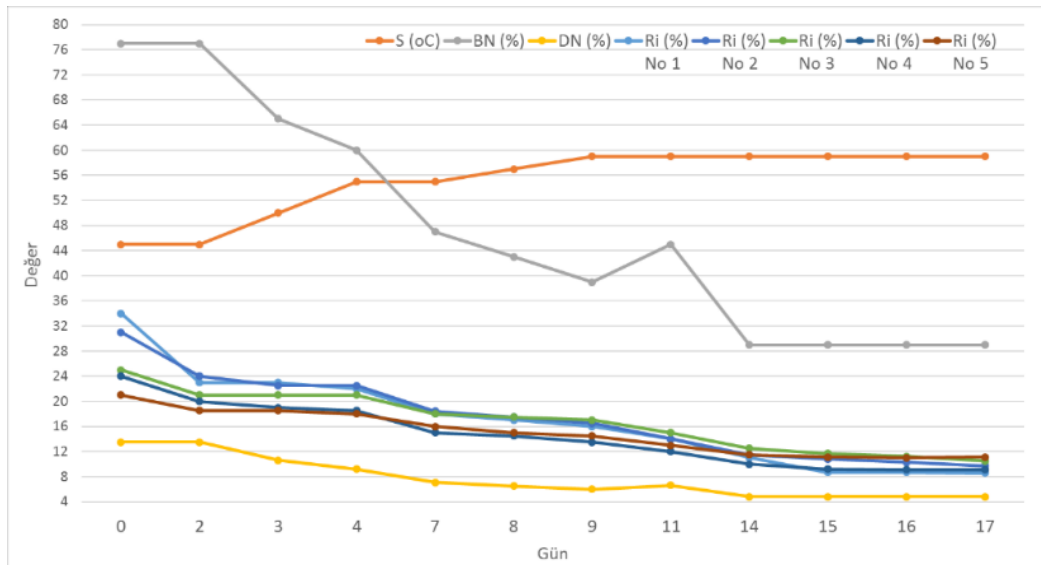
Kurutma süresince ortam şartları ve kereste rutubetleri incelenmiş ve Şekil 12’de gösterilmiştir.

Görüldüğü üzere, 11. günde yaşanan kondenzasyon cihazı arızası dışında doğrusal bir kurutma gerçekleştiği söylenebilir. Fırın içerisinde maksimum 60°C sıcaklık ve

minimum %28 bağıl nem (en düşük denge nemi (Simpson, 1973’e göre) %4,5) yakalanmış olup, 25 mm kalınlığındaki meşe papel taslaklarında yakalanmak istenen hedef sonuç rutubeti için yeterli olduğu görülmektedir. Ayrıca kerestelerin ortalama %27,2 başlangıç neminden, %9,2 sonuç nemine 17 günde ulaştığı (günde %1 kuruma) tespit edilmiştir. Vanicek (2002) firması (önce Vanicek - VT Trockentechnik, şimdi Mühlböck) tarafından önerilen hesaplamada (Ünsal vd., 2015), 25 mm kalınlığındaki akmeşe için günde %0,1 – 0,2 kuruma hızı bulunmaktadır. Ayrıca Milić vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, 5 mm kalınlığındaki yine akmeşe papeller de kondenzasyonlu fırında günde ortalama %0,6 kuruma hızıyla kurutulmuştur. Bu iki çalışmadaki kurutma hızları referans alındığında, bu çalışmada kurutmanın nispeten hızlı gerçekleştirildiği söylenebilir. Bununla birlikte, fırında kerestelerdeki rutubet takibi için kullanılan sensör verilerine göre, 14. günden sonra kereste rutubetlerinin yatay bir seyirde ilerlemesi, denkleştirme periyoduna benzer bir uygulamanın olduğunu da göstermektedir.



Şekil 11. Dikey boşluk kapatma levhasının fırın içerisine yerleştirilmesi



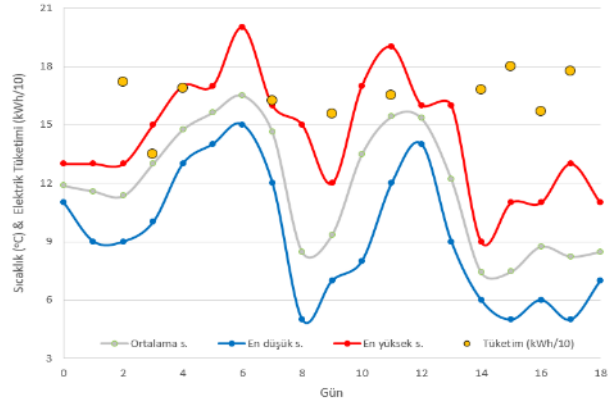
Şekil 12. Kurutma sırasındaki ortam şartları ve kereste rutubetleri*

*S: Sıcaklık, BN: Bağıl Nem, DN: Denge Nemi, Ri: Kereste Rutubeti İçeriği

Şekil 13'te görüldüğü üzere, sıcaklıklarda dalgalanma olmasına karşın (ortalama sıcaklıklarda 7,4 – 16,5 °C), enerji tüketiminde benzer bir dalgalanma görülmemiştir (134,7 – 179,8 kWh). Bununla birlikte enerji tüketimindeki 65,1 kWh'lık farkın, fırın yalıtımını değerlendirmek adına, enerji tüketimi verileri dış ortamdaki sıcaklık değişimleriyle ilişkilendirilmiş ve Şekil 14'te gösterilmiştir.

Şekil 14'te görüldüğü üzere, hava sıcaklığı önceki güne göre -5 ila 2°C arasında değişmesine karşın, elektrik tüketiminde buna paralel bir değişim yaşanmamıştır. Bu duruma fırın yalıtımının iyi ve/veya fırının kapalı bir mekânda kalmasının etkili olduğu söylenebilir (Şekil 15). Buna bağlı olarak kurutmanın son 5 günündeki enerji tüketimi ortalamasının, çok az bir farkla ilk 11 günkü ortalamaya göre daha yüksek (170,33 > 159,66 kWh) olmasının nedeni de kurutma şartlarından kaynaklanmış olabilir. Çünkü kurutmanın 14. gününden itibaren daha yüksek sıcaklık (60°C) ve daha düşük denge nemi (%4,8) şartları sağlanmaya çalışıldığı için, kondenzasyon cihazının daha sık devreye girerek, enerji tüketimini arttırmış olabileceği söylenebilir.

Hava hareket hızları, boşluk kapatma levhası (panel) konulma durumuna göre her iki hol boşluğunda belirlenen ölçüm pencerelerinde ölçülmüş ve aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Şekil 16 ve Şekil 17).

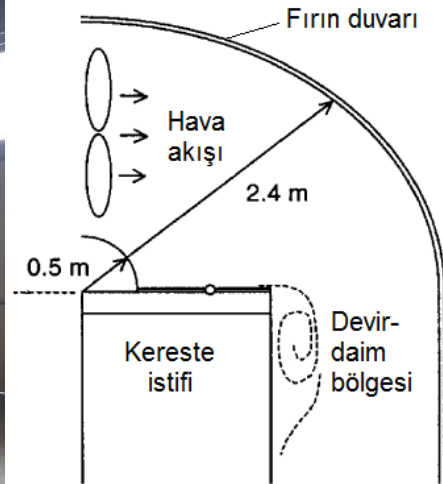


Şekil 13. Kurutma sırasındaki dış ortamdaki hava durumu ve fırının enerji tüketimi*

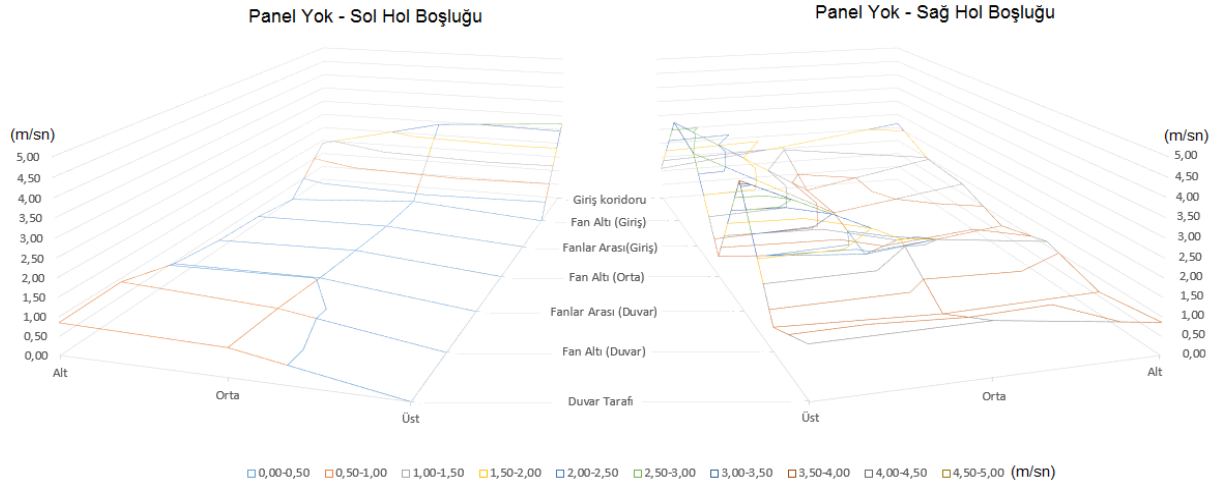
*s: Sıcaklık, kWh: Kilowatt saat. Enerji tüketimi verileri, sıcaklıkla benzer aralıkta kalması için, 10'a bölünerek gösterilmiştir.



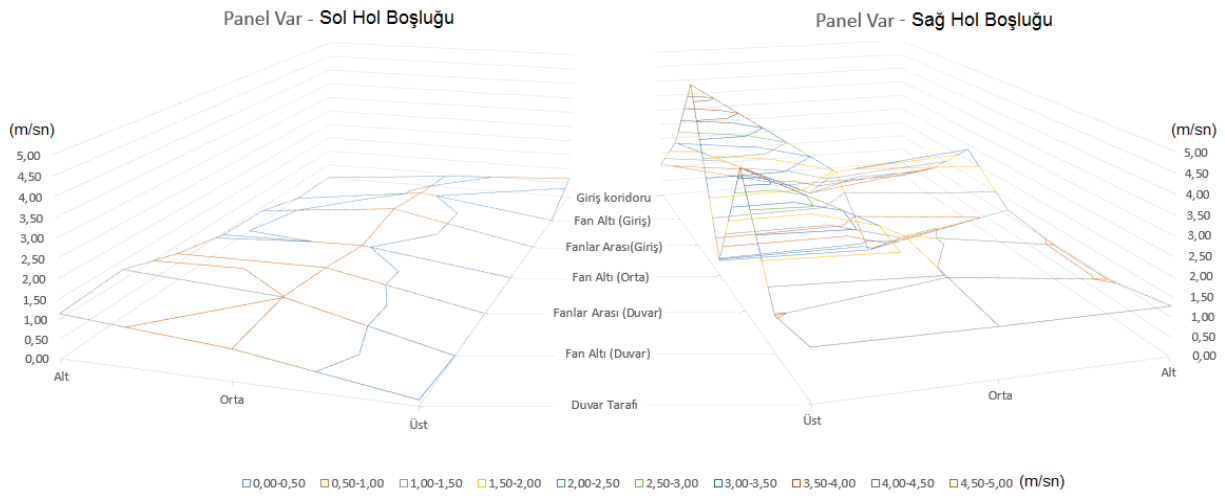
Şekil 14. Kurutma sırasındaki hava durumu ve enerji tüketimi ilişkisi



Şekil 15. (Sol) Fırının atölye binası içindeki konumu, (Sağ) İstif üst katlarındaki hava akışında oluşan devir daim bölgesi (Nijdam ve Keey, 2002)



Şekil 16. Panel (boşluk kapatma levhası) yokken hol boşluklarındaki hava hareket hızları (m/sn)

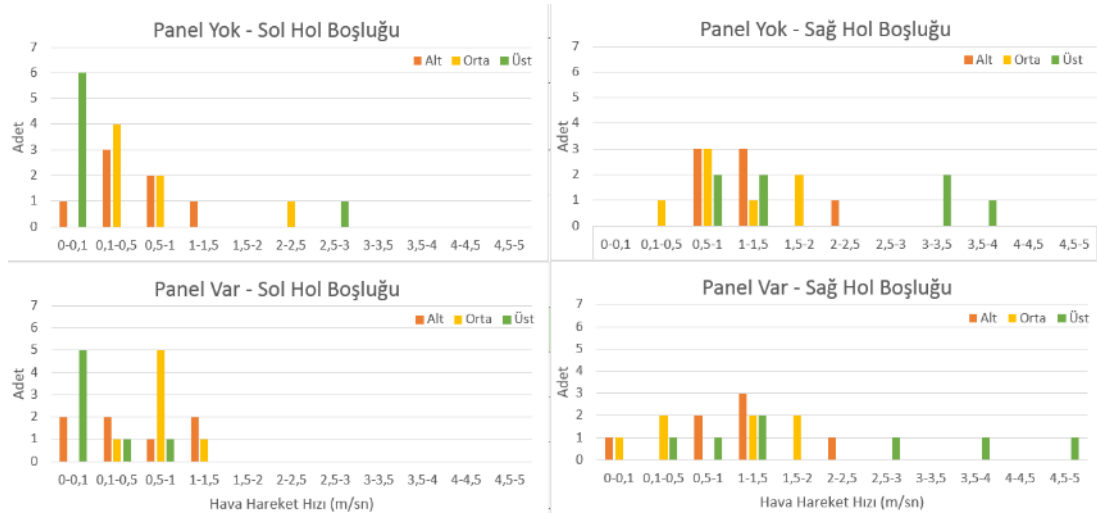


Şekil 17. Panel (boşluk kapatma levhası) varken hol boşluklarındaki hava hareket hızları (m/sn)

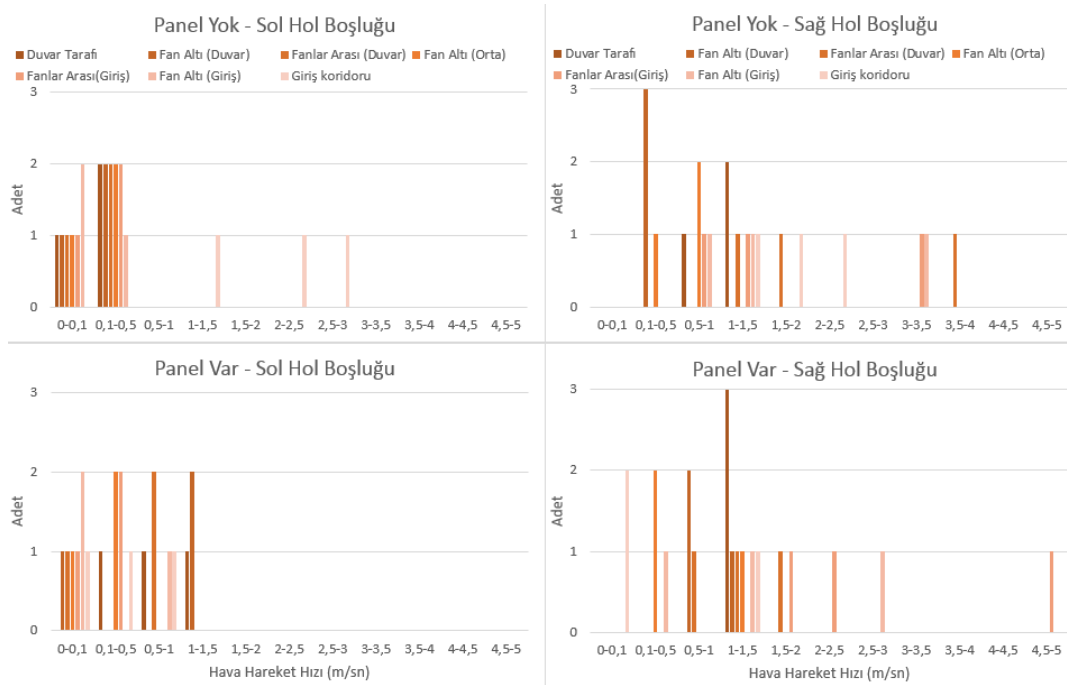
Şekillerde görüldüğü üzere; hava hareketi panel yokken sağ hol boşluğunda ve derinlik yönünde ise özellikle boş olan giriş koridorunda yoğunlaşmış ve diğer taraflarda ise hızı 1 m/sn altında kalmıştır. Sağ hol boşluğunda hava hareketlerinin fan altında yoğunlaştığı, sol hol boşluğunda ise özellikle üst kısımda (giriş koridoru hariç) hava hareketinin ulaşmadığı tespit edilmiştir. Panel konulduktan sonra ise; giriş koridorundaki hava hareketi kesilip, diğer kısımlara dağıldığı söylenebilir. Çünkü her iki hol boşluğunda da hava hareket hızlarının daha homojen bir şekilde dağılıp arttığı tespit edilmiştir (sol hol boşluğunun üst kısmı hariç). Üst kısımda panel konulmasından bağımsız olarak hava hareketinin oluşmamasında, üst katlardaki düzgün olmayan çita hizalarından ve/veya hava hareketinin fanlardan istif katlarına dönüş hareketindeki zayıflamadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bu durum Nijdam ve Keey'in (2002) çalışmasında da, kereste istifi üst katlarındaki hava hareketinde devir daim oluşumundan kaynaklandığı şeklinde belirtilmiştir (Şekil 15).

Kantay (1993) tarafından önerilen çita kalınlıkları ve aralıkları kullanılmasına karşın, sağ hol boşluğunda yer yer hızı 4 m/sn'ye kadar çıkan hava hareketi, diğer hol boşluğuna geçerken düşmekte (ort. 1,45 m/sn > 0,55m/sn) ve özellikle üst tarafın önemli bölümünde hava hareketi

bulunmamaktadır. İstif katları arasından 2,5 metre mesafeyi geçen havanın, keresteler arasındaki boşluklardan geçerken yön değiştirme, sürtünme, çarpma vb. çeşitli nedenlerden dolayı enerjisinin azalarak hızının düşmesi doğaldır. Ancak bir kurutma için ideal hava hareket hızı olan 1 m/sn'nin altına düştüğü için kurutma homojenliğini etkileyecek niteliktedir (Denig vd., 2000). Genellikle endüstriyel kurutmada standartlaşan 1 x 1 x 4 m istif boyutları tercih edilmektedir. Bu boyutlardaki istiflemelerde çitalamada sorunlar daha az olmaktadır. Ancak bu çalışmadaki gibi daha büyük hacimde bir istifleme yapıldığında, çita hizalarının bozulması sorunlarıyla karşılaşabilmektedir. Çünkü standart çita uzunlukları istif genişliğinden kısa olduğundan, bu yönde birden fazla çita konulmaktadır. İstiflemenin elle yapılması, yüksek ve dar alanlarda çalışılması vb. sebepler nedeniyle çitalamaya gerekli özen verilememektedir. Bu nedenle homojen hava hareketinin sağlanması için, küçük kapasiteli fırınlarda da standart istif ebatlarının korunması daha iyi olacaktır. Ayrıca Şekil 6'da görüldüğü gibi fanlarda üretilen hava hareketinin enerjisi ve hızı, fanların hemen altındaki istif katlarında düşük seviyede olmaktadır. Çünkü direkt olarak hava hareketinin geçişi üst katlardaki keresteler tarafından engellenmekte ve hava daha çok orta ve alt istif katlarına yönelmektedir.



Şekil 18. Düşey yöndeki hava hareket hızı sıklık dağılımları



Şekil 19. Yatay yöndeki hava hareket hızı sıklık dağılımları

Düşey yöndeki hava hareketi incelendiğinde (Şekil 18); sol hol boşluğundaki düşük hava hareket hızı yine ön plana çıkmakta ve panel konulmasıyla düşük düzeyde hava hareketi iyileşmesi olduğu söylenebilir. Ancak bu iyileşme bile gereken hava hareket hızından oldukça düşük kalmıştır (ortalama $0,52 < 1,3$ m/sn). Sağ hol boşluğunda ise, panel ilavesiyle daha homojen hava hareketi sağlandığı söylenebilir. Yatay yöndeki hava hareketi incelendiğinde ise (Şekil 19); her iki hol boşluğunda panel konulmasıyla daha homojen hava dağılımı sağlandığı söylenebilir. Her iki hol boşluğundaki hava hareketindeki bu düzensizlik ve farklılıkların, kerestelerdeki rutubet dağılımına etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada hedeflenen %9 sonuç rutubeti değeri için standartların belirttiği aralıklar ve kurutma sonrası oluşan verilerin standartlara göre sınıflandırılması Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Tabloda görüldüğü üzere, %9 olan hedef sonuç rutubeti olan ortalama (%9,2) yakalanmıştır. Ancak rutubet

aralığının %5,2'lik aralıkta değişmesi, EDG (1994) kriterlerine göre S (Standart) kalitede olmasına, TS EN 14298 (2017) göre ise uygun bir kurutma olmamasına neden olmuştur. Rutubet aralığının bu kadar geniş olmasının nedeninin ise homojen olmayan hava hareketinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü her iki hol boşluğunda bulunan kerestelerde yapılan rutubet ölçümleri sonucunda, istatistiksel açıdan anlamlı (Önem düzeyi: $0,00 < 0,05$) bir farklılık çıkmıştır. Fanların bulunduğu sağ hol boşluğundaki kerestelerin ortalama rutubeti %8,1'ken, kondenzasyon cihazının yakınında bulunan kerestelerin ortalama rutubeti ise %10,3 olarak tespit edilmiştir. Bu farklılıkta, sağ hol boşluğunda (panel konulmadan) hava hareketinin $4,97$ m/sn'ye kadar çıkmasına karşın, sol hol boşluğunda ancak $0,93$ m/sn'ye çıkabilmesinin etkili olduğu söylenebilir.

Çizelge 1. Sonuç rutubetlerine göre değerlendirme

Standart & kalite sınıfı	EDG (1994)			TS EN 14298 (2017)
	S (Standart)	Q (Kaliteli)	E (Özel)	
%9 için izin verilen rutubet aralığı (%)	7,0 – 13,0	8,0 – 12,0	9,0 – 11,0	8 – 10
Sonuç rutubetleri (%)	Aralık 7,0 - 12,2	Değerlendirme S (Standart)	Aralık 7,0 - 12,2 => Uygun değil	Ortalama 9,2 => Uygun

4. Sonuç ve öneriler

Kurutma, kereste özelliklerini (fiziksel, mekanik direnç, biyolojik dayanım vb.) ve dolayısıyla kalitesini etkileyen en önemli üretim aşamalarından biridir. Günümüzde kurutmalar teknik kurutma fırınlarında yapılmasına karşın, kereste kalitesinin korunması adına dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. Bu hususlara dikkat edilmediği takdirde, en kaliteli kurutma fırını kullanılsa da, istenen kalitenin yakalanması çok zordur.

Bu çalışma kapsamında hava hareketinin dağılımı, kontrolü ve kurutma kalitesine etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmayla yeterli ve homojen hava hareketinin istif katları arasında sağlanabilmesi için, istif etrafında boşluk oluşturulmaması gerektiği verilerle ortaya konulmuştur. Bununla birlikte fırınlar sabit hacimli olmasına karşın, kurutulması gereken kereste partilerinin değişken hacimlerde olması nedeniyle, çoğu zaman bu sabit hacim tamamen doldurulamamakta ve istif kenarlarında boşluklar oluşabilmektedir. Bu kısımların, hareketli kanatçık sistemi, bu çalışmada da kullanılan boşluk kapatma levhası vb. ile mutlaka kapatılması gerektiği söylenebilir. Aksi takdirde hava dolanımı boş kısımlardan olmakta, bu da yetersiz ve heterojen kurutmalara yol açmaktadır.

Bu çalışmada ayrıca, boşluk kapatma levhası kullanılmasından bağımsız olarak; fanların bulunmadığı hol boşluğunun üst kısmında, istif katları arasında çok düşük hava hareket hızları gözlemlenmiştir. Bunda çıtalama kalitesinin ve/veya fanlardan istif katlarına dönüş hareketinin etkisi olduğu düşünülmektedir. Çözüm için ise standart istif ebatlarından uzaklaşılması ve klasik fırınlarda fanlarda üretilen hava hareketinin istenen istif katlarına yönlendirilmesi için, bu çalışmada da gösterilen çeşitli aparatlar ilave edilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmada ayrıca enerji tüketimi verileri de incelenmiş olup, bu konuda farkındalık oluşturmaya çalışılmıştır. Elde edilen veriler özellikle bu tüketimi görünür kılmıştır ve bu sayede fırın performansı, kurutma maliyeti gibi diğer değişkenlerle ilişkilendirilebilir hale gelmiştir. Bu çalışmada bu veriler kurutma programı ve dış ortam sıcaklığı ile ilişkilendirilerek, özellikle fırın yalıtımının performansı yeterli düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Fırın kurulumu sırasında ısı kayıplarının yaşandığı kısımlara (duvar yapısı, kapılar vb.) yeterli önem verilmediği takdirde, kondenzasyonlu fırınlar gibi kapalı hava dolanımı sağlanan fırınlarda bile enerji giderlerini doğrudan etkilendiği söylenebilir.

Açıklama

Yazarlar, çalışma kapsamında yapılan ölçümlerde destek veren orman endüstri mühendisi Alper Kılıçarslan'a teşekkür etmektedir.

Kaynaklar

- Brunner - Hildebrand, 2023. Hildebrand Turbo Technology®. Hildebrand Holztechnik GmbH and Brunner Trockentechnik GmbH, <https://www.brunner-hildebrand.de/en/innovation/hildebrand-turbo-technology>, Accessed: 23.12.2022.
- Denig, J., Wengert, E.M., Simpson, W.T., 2000. Drying Hardwood Lumber. US Department of Agriculture Forest Products Laboratory, Madison, Technical Report, FPLGTR-118.
- EDG, 1994. EDG - Recommendation, Assessment of Drying Quality of Timber (Ed: Welling, J.). European Drying Group (EDG), Pilot Edition (for Testing).
- Freemeteo, 2022. Bahcekoy - Daily weather history. Freemeteo, <https://tr.freemeteo.com/havadurumu/bahcekoy/history/daily-history/?gid=751265&date=2022-12-22&station=5328&language=turkish&country=turkey>, Accessed: 23.12.2022.
- Görgülü, Y.F., Aydın, M., 2023. Computational fluid dynamics and thermal analysis of an unloaded lumber-drying kiln. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 23(1): 64-74.
- Kantay, R., 1993. Kereste Kurutma ve Buharlama. Ormancılık Eğitim ve Kültür Vakfı, Yayın No: 6, İstanbul.
- Katres, 2022. Animace. KATRES spol. s.r.o., Çekya, <https://www.youtube.com/watch?v=-v3IHGclfvfs>, Accessed: 23.12.2022.
- Koch, G., 2008. Discoloration of wood in the living tree and during processing. Cost E 53 project conference, 29-30 October, Delft, The Netherlands, pp. 11-18.
- Langrish, T.A., Keey, R.B., 1996. The effects of air bypassing in timber kilns on fan power consumption. In Proceedings of Chemeca 96: Excellence in Chemical Engineering; 24th Australian and New Zealand Chemical Engineering Conference and Exhibition, 30 September – 2 October, Sydney, Australia, pp. 103-100.
- Logica, 2022. WoodWizard 2 software. Logica H&S S.r.l, Italy, <https://www.logica-hs.it/en/woodwizard2>, Accessed: 23.12.2022.
- Milić, G., Todorović, N., Veizović, M., Popadić, R., 2021. Drying of oak wood lamellas: Part 1. Analysis of the process in a dehumidification kiln. Glasnik Sumarskog fakulteta, 124: 45-58.
- Nijdam, J.J., Keey, R.B., 2002. New timber kiln designs for promoting uniform airflows within the wood stack. Chemical Engineering Research and Design, 80(7): 739-744.
- Simpson, W.T., 1973. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. Wood and Fiber Science, 5(1): 41-49.
- SPIB, 2023. Drying Quality: The Importance of Proper Baffling, Southern Pine Inspection Bureau (SPIB). <https://blog.spib.org/drying-quality-the-importance-of-proper-baffling>, Accessed: 18.06.2023.
- Steiner, Y., Vestøl, G. I., Horn, H., Sandland, K.M., 2011. Impact of various measures to optimize the air velocity in an industrial wood-drying process. Wood Material Science and Engineering, 6(1-2): 15-22.

- Sun, Z.F., Carrington, C.G., Anderson, J.A., Sun, Q., 2004. Air flow patterns in dehumidifier wood drying kilns. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(10): 1344-1352.
- Sun, H.H., Yan, P., Fan, L. Y., Zhang, X.Y., 2015. Numerical simulation of hot air drying kiln velocity field based on computational fluid dynamics. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 3(5): 9-13.
- TS EN 13183-2, 2012. Biçilmiş yapacak odun (kereste) parçasının rutubet muhtevası - Bölüm 2: Elektrikli direnç yöntemiyle tahmin. TSE, Ankara.
- TS EN 13183-3, 2012. Biçilmiş yapacak odun (kereste) parçasının rutubet muhtevası - Bölüm 3: Kapasitans yöntemiyle tahmin. TSE, Ankara.
- TS EN 14298, 2017. Biçilmiş yapacak odun (kereste) - Kurutma kalitesinin değerlendirilmesi. TSE, Ankara.
- Ünsal, Ö. 2002. Teknik kurutmada fırın boyutlarının ve hava hareket hızının kurutma kalitesi ve süresi üzerine etkisi. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 1(52): 99-114.
- Ünsal Ö., As N., Dündar T., 2015. Güç Kuruyan Bazı Ağaç Türlerinin Kurutulmasında Akustik Emisyon Yöntemi Kullanarak Kurutma Kalitesi, Süresi ve Ekonomisini İyileştirme Olanakları. Proje Sonuç Raporu, Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Proje No: 112-O-818, Ankara.
- Vanicek, 2002. Take Over of VT Trockentechnik. Mühlböck Holzrocknungsanlagen GmbH, Austria, <https://www.muehlboeck.com/en/company/about-us-49549.html>, Accessed: 23.12.2022.
- Welling, J., Salin, J., de Corte, J., Sandland, K., Nemeth, R., Milic, G., Knaggs, G., 2010. Dried Timber-How to specify correctly. European Drying Group (EDG), COST E, 53, European Science Foundation.
- Zadin, V., Kasemägi, H., Valdna, V., Vigonski, S., Veske, M., Aabloo, A., 2015. Application of multiphysics and multiscale simulations to optimize industrial wood drying kilns. *Applied Mathematics and Computation*, 267: 465-475.
- Zdanski, P.S.B., Possamai, D.G., Vaz, M., 2015. A numerical assessment of the air flow behaviour in a conventional compact dry kiln. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 8(3): 367-376.