POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)
URL: http://dergipark.org.tr/politeknik

CLARIVATE ANALYTICS
EMERGING SOURCES CITATION INDEX
INDEXED

Güneş enerjili eko tasarım kereste kurutma sistemi

Solar powered eco design timber drying system

***Yazar(lar) (Author(s))**: Emre SARI[1], Yaren GÜVEN[2], Mustafa AKTAŞ[3]*

ORCID[1]: 0000-0002-2066-5515

ORCID[2]: 0000-0003-0732-4692

ORCID[3]: 0000-0003-1187-5120

ERKEN GÖRÜNÜM

To cite to this article: Sarı E., Güven Y. ve Aktaş M., "Güneş enerjili eko tasarım kereste kurutma sistemi", ***Journal of Polytechnic***, *(*): *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Sarı E., Güven Y. ve Aktaş M., "Güneş enerjili eko tasarım kereste kurutma sistemi", ***Politeknik Dergisi***, *(*): *, (*).

Erişim linki (To link to this article): http://dergipark.org.tr/politeknik/archive

DOI: 10.2339/politeknik.1299114

Güneş Enerjili Eko Tasarım Kereste Kurutma Sistemi

Solar Powered Eco Design Timber Drying System

Önemli Noktalar (Highlights)

- *Eko tasarım güneş enerjili kereste kurutucusu / Eco-design of solar timber dryer*
- *PV/T güneş kolektörünün kereste kurutma sistemine entegrasyonu / Integration of PV/T solar collector into timber drying system*
- *Enerji depolama ile kesintisiz kurutmanın sağlanması / Ensuring uninterrupted drying with energy storage*
- *Sıcaklık ve bağıl nem kontrollü bir sistem ile istenilen homojen kurutmanın sağlanması / Providing the desired homogenius drying with a temperature and relative humidity controlled system*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Kendi enerjisini üreten, enerjisini etkin kullanan kapalı çevrim bir eko sistem tasarlanmıştır. / A closed-loop eco design that produces its own energy, uses energy effectively was designed.

Şekil. Tasarlanan sistemin şematik çıktıları **/ Figure.** Schematic outputs of the designed system

Amaç (Aim)

Kerestenin güneş enerjisiyle kurutulmasına yönelik kapalı çevrim, karbon emisyon değeri ve işletme giderleri düşük yeni bir sürdürülebilir sistem tasarlanması amaçlanmıştır. / It was aimed to a sustainable design a new closed cycle, low carbon emission value and low operating costs system for drying timber with solar energy.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kerestenin farklı koşullar altında kurutularak kurutma sonrası kalitesine etki eden parametreler belirlenerek incelenmiştir. / The parameters affecting the quality of the timber after drying by drying under different conditions was determined and examined.

Özgünlük (Originality)

Güneş enerjisi ile kesintisiz ve kaliteli kurutulmuş ürün sağlayabilecek kurutucunun tasarımı. / The design of the dryer that can provide uninterrupted and high quality dried product with solar energy.

Bulgular (Findings)

Kurutma işlemi sonucunda kerestede oluşabilecek çatlaklar, renk ve şekil değişimleri gibi kereste kusurlarını azaltabilecek yeni bir tasarımın ortaya konması. / Putting forth a new design that can reduce timber defects such as cracks, color and shape changes that may occur in the timber as a result of the drying process.

Sonuç (Conclusion)

Küresel ısınmanın etkilerini azaltabilecek sürdürülebilir bir kereste kurutma sistemi tasarlanmıştır. / A sustainable timber drying system was designed that can reduce the effects of global warming.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Güneş Enerjili Eko Tasarım Kereste Kurutma Sistemi

Araştırma Makalesi / Research Article

Emre SARI[1], Yaren GÜVEN[2*], Mustafa AKTAŞ[2]

[1]Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği A.B.D., Gazi Üniversitesi, Türkiye
[2]Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 18.05.2023 ; Kabul/Accepted : 07.08.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 25.08.2023)

ÖZ

Sera gazı emisyonlarının giderek artması küresel ısınma ve iklim sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. İklim değişikliği ve küresel ısınma sorunlarının önüne geçilmesi için emisyonların ve fosil yakıtların kullanımının azaltılması gerekmektedir. Paris İklim Anlaşması kapsamında karbon emisyon değerlerinin azaltılması, kendi enerjisini üreten, yenilenebilir ve çevre kirliliğinin en az olduğu sistemlere yönelim hedeflenmektedir. Bu çalışmada, kerestenin güneş enerjisi ile farklı koşullarda sürdürülebilir bir sistem ile kurutulmasına yönelik yeni bir eko tasarım yapılması amaçlanmıştır. Kurutma kusurları, kurutulmuş kereste kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Yeni bir hava akış yapısına sahip tasarım ile güneş enerjisiyle hem sıcak hava hem de elektrik üretimi hedeflenmiştir. Kendi enerjisini üreten yeni tip enerji depolamalı ve enerjinin etkin kullanıldığı eko tasarım kapalı çevrim sıcaklık ve bağıl nem kontrollü bir kurutma sistemi tasarlanmıştır. Ortaya konulan sistem ile enerji verimliliğinin artırılması, karbon emisyon değeri ve çevre kirliliğinin azaltılması amaçlanmıştır. 3,03 kWh/kg su özgül enerji tüketim değeri kabulü ile bu tasarımda üründen 1 ton nem alındığında 1,33 ton CO_2-eşdeğer sera gazı emisyonu salımı önlenmiş olacaktır. İşletme giderleri düşük olan eko tasarım kapalı çevrim bir kurutma sistemi ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, kereste kurutma, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği.

Solar Powered Eco Design Timber Drying System

ABSTRACT

Increasing greenhouse gas emissions cause global warming and climate problems. In order to prevent climate change and global warming problems, it is necessary to reduce emissions and the use of fossil fuels. Within the scope of the Paris Climate Agreement, it is aimed to reduce carbon emission values, to produce their own energy, to operate and to systems with the least environmental pollution. In this study, it was aimed to make a new eco design for the drying of timber with solar energy in different conditions with a sustainable system. Drying defects significantly affect the quality of dried timber. With a design with a new airflow structure, it was aimed to generate both hot air and electricity with solar energy. An eco design closed loop temperature and relative humidity controlled drying system that produces its own energy was designed, with new type of energy storage and efficient use of energy.With the system put forward, it was aimed to increase energy efficiency, reduce carbon emission value and environmental pollution. Assuming a specific energy consumption value of 3.03 kWh/kg water, in this design, when 1 ton of moisture is taken from the product, 1.33 tons of CO2-equivalent greenhouse gas emission will be prevented. An eco design closed loop drying system with low operating costs was put forth.

Keywords: Solar energy, timber drying, renewable energy, energy efficiency.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

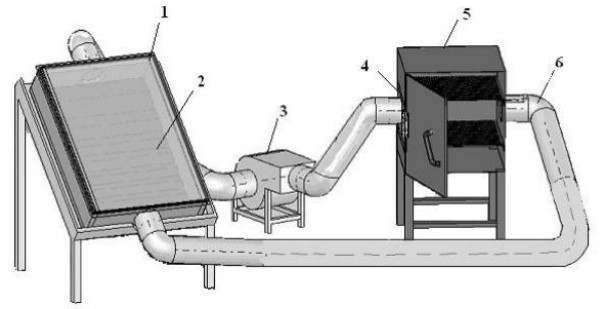
Kurutma, maddelerin içerisindeki sıvıların uzaklaştırılması işlemidir. Kurutma uygulamasında nem almanın farklı metotları vardır. Bu yüzden ürünlerin istenilen nem değerlerine getirilmesi için uygulanan yöntemler bütününe kurutma sistemleri denir [1]. Kurutma, ürünlerin kullanım ömrünü uzatmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Gıda ve ahşap endüstrisi kurutma uygulamasının yoğun kullanıldığı alanlardır. Meyve ve kereste kurutma uygulamaları bunlara örnektir. Kurutmanın amacı, kurutulacak ürün içerisindeki su miktarını azaltarak bozulma sürelerini uzatmaktadır [2]. Ürünlerin düşük su aktivitesi içermesi, kullanım ömürlerinin uzun ve piyasa değerlerinin fazla olmasına neden olmaktadır. Ürünler kurutulduktan sonra saklama koşulları da oldukça önemlidir. Ürünlerin paketlenme şekilleri, saklandığı ortamın sıcaklık ve bağıl nem değerleri bozulma koşullarını önemli ölçüde etkilemektedir. Kurutma sistemlerindeki en önemli kriterler ise ürün kalitesi ve kurutma ekonomisidir. Ürün kalitesini kimyasal bozulmalar, renk değişimleri, kurutma sırasında kirlenme-bulaşma olmaması, hızlı ve basit rehidrasyon gibi parametreler etkilemektedir. Kurutma ekonomisini ise minimum ürün kayıpları, ucuz

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : yarenguven@gazi.edu.tr

ERKEN GÖRÜNÜM

enerji kaynakları, suyun hızlı uzaklaştırılması ve karmaşık olmayan kurutma cihazları etkilemektedir. Güneş enerjili ve enerji depolamalı bir sistem ile gıda ve ahşap malzemelerinin kurutulması, sürdürülebilir olması ve depolanan enerjinin güneşin olmadığı zamanlarda kullanılması sebebiyle ekonomik bir sistemdir. Kurutma uygulamalarındaki diğer bir önemli faktör ise kurutma hızıdır. Kurutma hızı kurutulacak ürüne göre ayarlanmaz ise deformasyonlar oluşmaya başlar. Bu yüzden kurutma hızına etki edenfaktörler vardır. Bunlar kurutma havası hızı, sıcaklığı, bağıl nemi, kurutulacak ürünün özellikleri, ürün istif kalınlığı, ısı transfer yöntemi, kurutma odasının geometrisi ve ürün hareketliliğidir. Bununla ilgili literatürde pek çok çalışma mevcuttur.

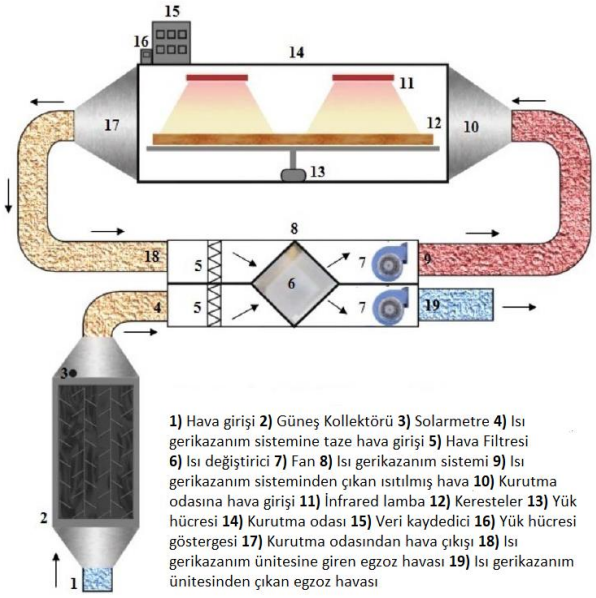
Ceylan ve ark. [3] çalışmalarında, Şekil 1'deki güneş enerjisi destekli kereste kurutma fırınını tasarlamışlardır. Tasarlanan sistem ile kereste içerisindeki nemin uygun koşullarda uzaklaştırılması sayesinde kurutma süreleri kısaltılmıştır. Böylece tasarlanan sistemin geleneksel kurutma sistemlerine göre daha az enerji tükettiği sonucuna varılmıştır. Kerestelerdeki nem ve sıcaklık kontrolleri 100±3°C sıcaklıkta 8 saatte bir yapılmıştır. Art arda yapılan ölçümlerde ürünlerdeki ağırlık değişimleri %1'den daha az ise keresteler kuru olarak kabul edilmiştir. Fırın içerisindeki hava hızları 4,5 m/s olduğunda kavak kerestesi için nem değeri %80 g su/g kuru maddeden %20 g su/g kuru madde değerine 13 saat sonunda getirilebilmiştir. Çam kerestesi için nem değeri %110 g su/g kuru maddeden %20 g su/g kuru madde değerine 19 saat sonunda getirilebilmiştir.



1. Güneş kolektörü 2. Emici plaka 3. Fan
4. Hava ayar klapesi 5. Kurutma kabini 6. Hava kanalı

Şekil 1. Güneş enerji destekli kereste kurutma sistemi (Solar assisted timber drying system)

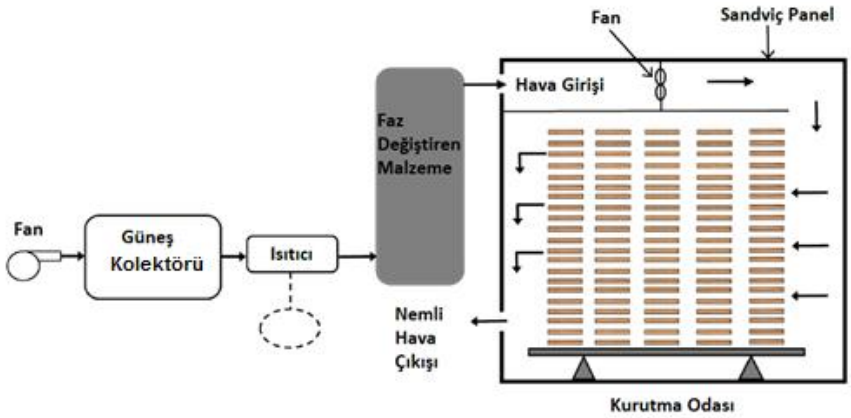
Ceylan ve ark. [4], kavak ve çam kerestelerini 24 saat çalışan ısı pompalı kurutucuda kurutmuşlardır. Kavak kerestesi için nem değeri 1,28 kg su/kg kuru maddeden 0,15 kg su/kg kuru madde değerine, çam kerestesi için ise nem değeri 0,60 kg su/kg kuru maddeden 0,15 kg su/kg kuru madde değerine düşürülmüştür. Kurutma odasında kerestelerin tamamındaki ağırlık değişimi kontrol edilerek belirlenen değerlere ulaştığında kurutma işlemi durdurulmuştur. 40°C sıcaklık ve 0,8 m/s hava hızında kavak kerestelerinin başlangıç nem değeri 1,28 kg su/kg kuru maddede iken, 70 saat sonunda 0,15 kg su/kg kuru madde değerine; çam keresteleri için nem değeri 0,60 kg su/kg kuru maddede iken, 50 saat sonunda 0,15 kg su/kg kuru madde değerine düşürülmüştür. Kurutma sırasında toplanan tüm veriler bilgisayara kaydedilmiş ve daha sonra analiz edilmiştir. Bu sistem için enerji kullanımının belirlenmesi amacıyla enerji analizi ve kurutma işlemi sırasındaki ekserji kayıplarını belirlemek için ekserji analizi de yapmışlardır. Aktaş ve ark. [5], Şekil 2'deki çalışmalarında, ahşabın konvektif-kızılötesi kuruma özelliklerini araştırmışlardır. Kızılötesi ısıtma sistemlerinin en büyük dezavantajı, yüzey sıcaklığının kontrolsüz bir şekilde aşırı yükselmesi ve bunun da ürüne zarar vermesidir. Bu çalışmada fırın içerisine yerleştirilmiş ürünlerin yüzey sıcaklıkları sürekli kontrol edilerek kızılötesi sistem gücü ona göre ayarlanmıştır. Böylece kızılötesi sistemlerin yüksek sıcaklıklara çıkması engellenerek ürünlerin zarar görmesinin önüne geçilmiştir. Analizler yapılırken kerestelerin yüzey sıcaklıkları 65°C ve alt sıcaklıkları ise 45°C'de tutulmuştur. %50 verimli hava kolektörü kullanılmıştır. 13 saat sonunda çam kerestesinin nem değeri 1,42'den 0,0948 g su/g kuru maddeye düşürülmüştür. Analizler yapılırken nem değeri, faydalı enerji oranı ve kütle difüzyon katsayıları gibi koşullar dikkate alınmıştır.



Şekil 2. Tasarımı ve imalatı yapılan kurutma sistemi (Designed and manufactured drying system)

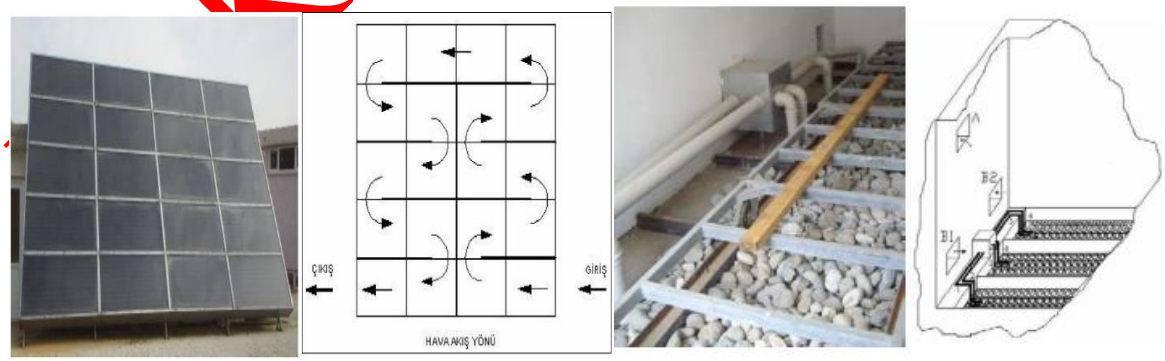
Li ve ark. [6] çalışmalarında, iki boyuta dayalı ahşap kusurlarının sınıflandırılması üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Çatlak ve huş kaplama yüzeyindeki lineer mineral hattının sınıflandırılması için yerel ikili diferansiyel uyarma modeline dayalı bir sınıflandırma algoritması sunulmuştur. Çalışmanın amacı kereste yüzeyin de kurutma sırasında oluşan çatlakların tespiti ve çözüm yollarıdır. Lamrani ve Draoui [7] Şekil 3'teki çalışmalarında, gizli ısı ve termal enerji depolama sistemi ile entegre edilmiş hibrit güneş-elektrikli ahşap kurutma makinesinin yeni bir tasarımını sayısal olarak incelemişlerdir. İncelenen ahşap kurutma sistemi temel olarak kurutma odası, güneş enerji toplayıcısı, depolama ortamı olarak faz değiştiren malzeme, termal enerji depolama sistemi ve elektrikli ısıtıcıdan oluşmaktadır.

Hem kurutma odası hem de termal enerji depolama sistemi için iki sayısal model geliştirilmiş ve mevcut deneysel verilerle doğrulanmıştır. Bu modeller TRNSYS yazılım standart kütüphanesi ile birleştirilmiş ve kurutma sistemi için global bir model sunulmuştur. Termal depolama sisteminin bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiş, optimum faz değiştiren malzeme miktarı ve tüp sayısı belirlenmiştir. Geliştirilen kurutucu sisteminin termal performansı, Fas'taki Tangier bölgesinin hava koşullarında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kurutma sisteminde termal depolama sisteminin kullanılmasının sürekli bir ahşap kurutma işlemi sağladığını ve kurutma odasının sıcaklığının tüm gece boyunca ortam havasından yaklaşık 4–20°C daha yüksek olduğunu göstermiştir. Kurutucu sistemin performans analizi, önerilen gizli ısı depolamalı kurutucu sistemde yıl boyunca kuruma süresinin 5 günü geçmediğini göstermiştir. Ancak ısı depolama sistemi olmayan kurutucularda yazın 7,5 gün ile kışın 12 gün arasında değişmiştir.



Şekil 3. Önerilen hibrit güneş – elektrik enerjili kurutucunun şematik diyagramı (Schematic diagram of the proposed hybrid solar-electric dryer)

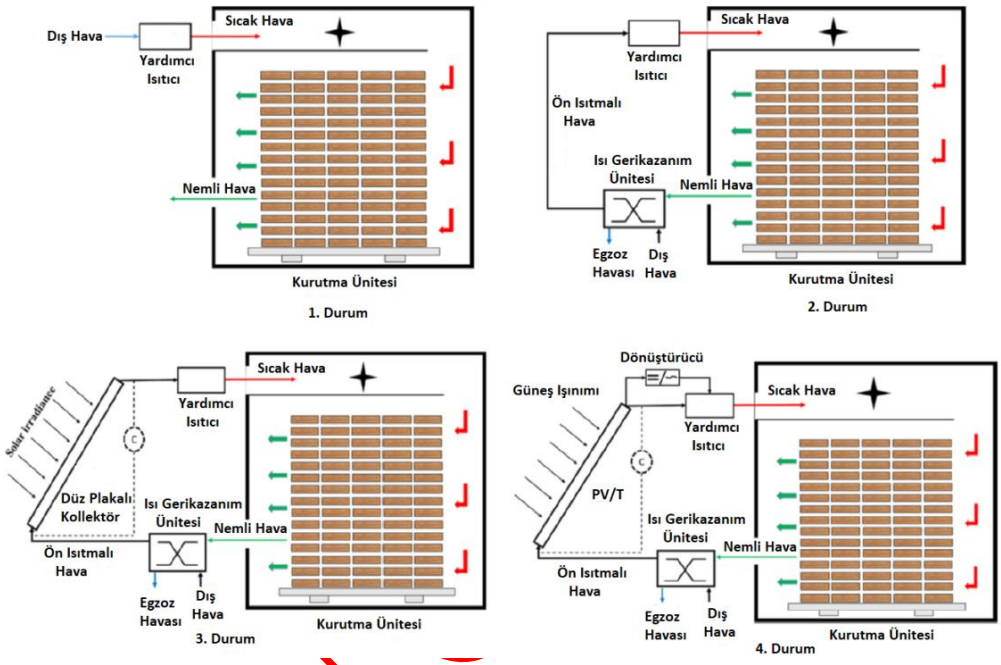
Korkmaz ve ark. [8] Şekil 4'teki çalışmalarında, güneş enerji destekli kurutma fırınının masif ahşap için kurutma performansını incelemişlerdir. Bu kapsamda ülkemizde güneş enerjisinin önemli olduğu Muğla şehrinde bulunan güneş enerjili fırında, çeşitli kalınlıklarda kızılçam kerestesi kurutulmuştur. Güneş enerjili kurutma sonunda 25 mm kalınlıktaki kerestelerde sonuç ile ortalama rutubeti arasındaki maksimum sapma %8,3-%8,0=%0,3 olarak elde edilmiştir. Kurutma sonunda çatlaklar, çökelmeler ve reçine sızmaları gibi kereste kusurları görülmemiştir. Yüzeyde bulunan budaklarda çatlaklar olduğu görülmüş olup, uç çatlaklar maksimum 90 mm uzunlukta görülmüştür. Güneş enerjisi ile yapılan kurutma sonucunda 50 mm kalınlıktaki kerestelerde sonuç ile ortalama rutubeti arasındaki maksimum sapma %9,1-%9,0=%0,1 olarak görülmüştür. Bu kereste için de kurutma sonunda çatlaklar görülmüş olup en fazla 110 mm uzunlukta olduğu ölçülmüştür. Böylece kurutma sonrasında doğal kurutma örneklerinin renginde, kızılötesi sistemlerin kontrolsüz sıcaklık yükselmesinden kaynaklandığı düşünülen değişimler görülmüştür. Tasarlanan sistem ile kurutulan ürünlerdeki renk değişimlerinin daha net anlaşılabilmesi için yanlarına doğal kurutma ile kurutulmuş ürünler yerleştirilerek incelemeler yapılmıştır.



Şekil 4. Güneş paneli yerleşimi, hava akış yönleri ve dağıtım hatları (Solar panel placement, air flow directions and distribution lines)

Lamrani ve ark. [9] Şekil 5'teki çalışmalarında, bir ısı geri kazanım ünitesi ve güneş enerjili hava ısıtıcıları ile entegre edilmiş geleneksel ahşap kurutma sistemlerinin enerji performansı ve ekonomik fizibilitesini sayısal olarak incelemişlerdir. Yalıtılmış bir kurutma odası, bir ısı geri kazanım ünitesi, bir düz plakalı hava kolektörü,

bir fotovoltaik/termal hava kolektörü ve bir yardımcı ısıtıcıdan oluşan dört farklı ahşap kurutucu tasarımı sunulmuş ve karşılaştırılmıştır. Sınır koşulları olarak iki farklı iklim bölgesinden gerçekçi meteorolojik verilerle bir ısı ve kütle transfer modeli kullanılarak yıllık dinamik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Atık ısının geri kazanılması ve her tip güneş enerjili hava ısıtıcısının entegre edilmesinin ahşap kurutma işleminde enerji tüketimi üzerindeki etkisi sunulmuş ve analiz edilmiştir. Sonuçlar, soğuk iklimde geleneksel ahşap kurutuculardan atık ısının geri kazanılmasının, yıllık enerji tüketiminde %41'e varan azalma ile sıcak iklime göre daha faydalı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kombine bir ısı geri kazanım ünitesi ve PV/T kolektör kullanılmasının, geleneksel kurutucuların enerji verimliliğini önemli ölçüde iyileştirdiği, sıcak ve soğuk iklimlerde yıllık enerji tüketimini sırasıyla yaklaşık %67,5 ve %49,5 oranında azalttığı da gösterilmiştir. Ekonomik analize dayalı olarak, ısı geri kazanım ünitesinin kullanımı maksimum 2 yıllık geri ödeme süresi ile her iki iklim bölgesinde de faydalı olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak PV/T kolektörün kullanımı, yalnızca geri ödeme süresinin yaklaşık 3,5 yıl olduğu sıcak iklimlerde ahşap kurutucular için önerilmiştir.



Şekil 5. Çalışılan ahşap kurutucuların şeması (Schema of studied wood dryers)

Nadhari ve ark. [10] çalışmalarında, bağıl nem kontrollü bir kurutma odası kullanarak Acaciamangium ahşap bloklarının izotermal kuruma kinetiklerini belirlemek üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Fick'in ikinci yasasının çözümüne dayalı olarak bir model geliştirilmiş ve belirleme katsayısı (R^2), kareler toplamı hatası (KTH), ortalama karesel hatanın kökü (OKHK) ve indirgenmiş (X^2) ile değerlendirilmiştir. Daha önceki çalışmalarda biyokütlenin kuruma davranışını tanımlamak için yaygın olarak kullanılan yarı teorik modeller ile karşılaştırılmış, kurutulmuş numunelerin gözeneklilik ve büzülme özellikleri de değerlendirilmiştir. Acaciamangium'un izotermal kuruma kinetiğini tanımlamak için 30, 35, 40 ve 45°C'lik dört kurutma sıcaklığı seviyesinin tümü için deneysel verilerle mükemmel bir uyum içinde numunelerin hacimsel büzülmesinin nem oranının azalmasıyla karesel olarak azaldığı görülmüştür. Kurutma işleminin aktivasyon enerjisi 41,07 kJ/mol olarak belirlenmiştir.

Lamrani ve ark. [11] çalışmalarında, gerçekçi çevresel koşullar altında ahşap kurutma endüstrisi için yeni bir basınçlı hava konveksiyonlu hibrit kurutucunun termal performansını ve çevresel etkisini sayısal olarak araştırmayı amaçlamışlardır. Önerilen kurutma sistemi esas olarak termal ve elektrik enerjisi üretimi için bir fotovoltaik/termal güneş hava toplayıcısı, yalıtımlı bir kurutma odası, havadan havaya ısı geri kazanım sistemi ve fanlardan oluşmaktadır. Kurutma sisteminin işleyişini simüle etmek için enerji ve kütle denklemlerine dayalı geçici bir model geliştirilmiş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Ajaccio şehrinin hava koşulları altında yıllık dinamik simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Hem güneşte kurutma hem de hibrit kurutma proseslerinde atık ısının kurutma ünitesinden geri kazanılmasının etkisi sunulmuş ve analiz edilmiştir. Sonuçlar 0,8 etkinliğe sahip ısı geri kazanım sisteminin kullanılmasının solar kuruma süresini yazın yaklaşık %40'a, kışın ise %32'ye kadar azalttığını göstermiştir. Hibrit kurutma işlemi için hem ısı geri kazanım sisteminin hem de PVT hava toplayıcının entegrasyonu geleneksel kurutucunun enerji tüketimini yaz aylarında %86,5'e, kış aylarında %73,5'e kadar azalttığı görülmüştür. Önerilen PVT hava toplayıcı ve ısı geri kazanım sistemine sahip hibrit ahşap

kurutucunun ahşap kurutma endüstrisi için uygun olduğuna karar verilmiş, geleneksel kurutucuların enerji verimliliğini artırmaya yardımcı olduğu ve yıllık CO_2 emisyon miktarını %78,5'e kadar düşürmeyi sağladığı gösterilmiştir. Zhan ve ark. [12] çalışmalarında, gözenekli katı malzemeler için iki analitik prosedürü (Crank yöntemi ve Dinçer yöntemi) yeniden değerlendirmiş ve kurutmaya tabi tutulan karaçam kerestesi için nem difüzyon ve transfer katsayılarının belirlenmesi için kullanmışlardır. Kurutma işlemi verilerini açıklamak için difüzyon benzeri bir denklem kullanılmıştır.Levha içindeki nem taşıma işleminin tek boyutlu olduğu varsayılmıştır. Belirli koşullarda karaçam kerestesinin makroskobik kuruma kinetik eğrileri deneysel olarak belirlenmiştir. Bu verilere dayanarak Dinçer analitik yöntemi ile nem difüzyon ve transfer katsayıları için hesaplamalar yapılmıştır. Geleneksel Crank yöntemiyle dinamik nem difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Genel olarak, Dinçer yöntemiyle hesaplanan difüzyon katsayılarının tümü Crank yöntemiyle hesaplananlardan daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçların iki analitik yöntem arasındaki farklılıklardan ve ayrıca katı nem difüzyon işlemi ile ısı transferi işlemi arasındaki farklı özelliklerden kaynaklanıyor olabileceği sonucuna varmışlardır. Bu nedenle, nem difüzyon diferansiyel denklemlerinin analiz ve çözüm prosedürlerinin gelecekte uyarlanması gerekmektedir. Kurutma sıcaklığının artmasıyla nem difüzyon katsayısı (D) ve buna bağlı olarak nem transfer katsayısı (k) artmaktadır. Ayrıca difüzyon katsayıları ile sıcaklık ve malzeme nem içeriği arasındaki ilişkiler Arrhenius denklemi ve bağlı su taşınımı teorisi kullanılarak analiz edilmiştir.

Ünsal ve ark. [13] Şekil 6'daki çalışmalarında, kurutulması zor ve uzun süren sapsız meşe (6 cm), doğu kayını (8 cm) ve sarıçam kerestelerinin (10 cm) kurutulmasında akustik emisyon (AE) yöntemini kullanarak, kerestelere zarar vermeden düşük kurutma sürelerini sağlayacak kurutma uygulamalarının belirlenmesini hedeflemişlerdir. Akustik emisyon yönteminde, akustik emisyon cihazı kullanılarak kurutma sırasında ahşap malzemede oluşabilecek çatlaklar, çökelmeler, deformasyonlar gibi kusurların oluşumunu ses dalgalarıyla haber vererek bu kusurların engellenmesi hedeflenmektedir. Böylece önceki kurutma sistemleri uygulanırken akustik emisyon sistemleri ile birlikte ölçümler alınmıştır. Bunun yanında ürünlerdeki kusurları bildiren ses dalgalarının frekans sınır değerleri belirlenmiştir. Yapılan kurutma çalışmalarında bu sınır değerlerini aşan kurutma şartlarında, kurutulacak ahşap malzemenin türüne göre sıcaklık ve nem değerleri ayarlanarak ideal kurutma koşulları sağlanmıştır. Ürün türü ve kalınlığına göre ayarlanan koşullar kurutma süre ve giderlerinin önemli ölçüde azalacağını göstermiştir. Akustik emisyon ile yapılan kurutma sisteminde, 10 cm kalınlığındaki sarıçam kerestesinin %50-15 nem değeri aralığında kurutma kusurları ve enerji tüketimlerinin en az olacağı düşünülürse 10 gün sonunda istenilen değere ulaşılacağı sonucuna varılmıştır. Tasarlanan sistem ile kurutma sırasındaki giderlerin %35 oranında azalacağı belirlenmiştir.

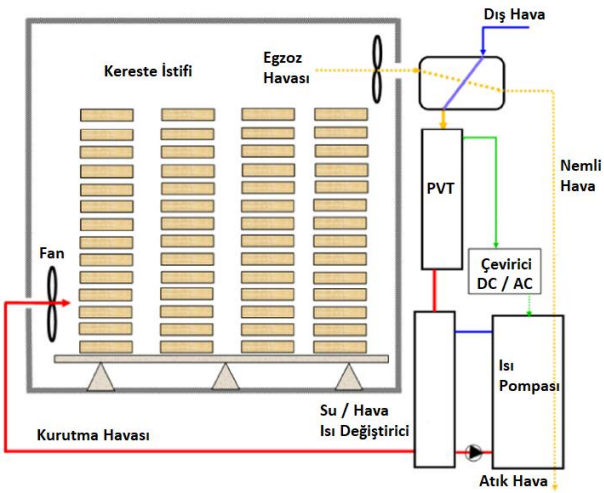
Şekil 6. 1 m^3 kapasiteli kurutma sistemi (1 m^3 capacity drying system)

Ceylan ve Ergün [14] çalışmalarında, nemli havanın termodinamik analizi üzerinde çalışan psikrometri ile bir kereste kurutucusundaki kurutma arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu çalışmada havayı uygun kurutma şartlarına getirmek için klima ünitesi kullanılmış ve ünitenin enerji ile kütle değişimi analiz edilmiştir. Isı pompalı kereste kurutma makinesinin psikrometrik analizinde çam ve kavak kerestesi kullanılmıştır. Kerestedeki kütle değişimi bir yük hücresi ile takip edilmiştir. Analizler sonunda, kurutma sonrası kerestede buharlaşan ve yoğunlaşan nem miktarları karşılaştırılmıştır. Bu değerlere bağlı olarak çam kerestesinden 50 saat sonunda 5,7 kg nem alınmıştır. Aynı koşullarda 70 saat sonunda kavak kerestesinden 12,5 kg nem alınmıştır.

Khouya [15] Şekil 7'deki çalışmasında, güneş panelleri için soğutma sıvısı olarak havayı kullanan bir ısı pompasını ve konsantre bir fotovoltaik sistemi birleştiren hibrit güneş kurutucu modeli önermiştir. Önerilen sistem, ahşap kurutma işlemlerini yürütmek için gerekli olan elektrik ve ısıyı aynı anda üretebilecektir. Birleşik sistemi oluşturan çeşitli bileşenler için matematiksel modeller geliştirilmiş, doğrulanmış ve onaylanmıştır. Ölçüm ve teorik sonuçlar arasındaki farkın %8'i geçmediği görülmüştür. Sonuçlar, tek başına ısı pompasını kullanan kurutma yöntemine kıyasla, birleşik sistemin kurutma süresini %18'e kadar azaltabildiğini göstermiştir. Kurutma parametrelerinin sistem performansı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, konsantre fotovoltaik termal sistemin genel verimliliğinin %34 ile %52 arasında değiştiğini göstermiştir. Kütle akış hızı arttıkça kompresör çalışma saatlerinin arttığı görülmüştür. Elektrik tasarrufu ve nem çekme oranı, rejeneratör verimini sırasıyla %25'ten %75'e çıkararak %57 ve %39 oranında iyileştirilmiştir. Önerilen sistemin, hibrit güneş kurutucularının güç tüketimini önemli ölçüde azaltabileceği ve literatürde açıklanan güneş enerjisi

ERKEN GÖRÜNÜM

modelleriyle etkin bir şekilde rekabet edebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7. Önerilen kurutucunun blok şeması (Block diagram of the proposed dryer)

Hızıroğlu [16] çalışmasında, fırın içerisinde kereste kurutma işleminin temel yöntemleri üzerinde incelemelerde bulunmuştur. Ahşap, nemdeki değişikliklerin bir sonucu olarak nem içeriği kazanan higroskopik bir malzemedir. Higroskopisite, ahşabın en ayırt edici özelliklerinden biridir. Her türlü ahşap ürünü, ahşabın nem içeriği ile çevredeki ortamın nem içeriği arasında bir denge noktası olan denge nem içeriğine ulaşana kadar çevredeki havadan nemi emer ve geri çeker. Ağaç ürünlerinin boyutları bağıl nemdeki dalgalanma ile değiştiğinden fırında kurutma ağaç ürünlerin verimli kullanımı için en önemli süreçlerden biri haline gelir. Nem içeriği uygun bir miktara düşürülene kadar ahşabın uygun şekilde işlenmesi, yapıştırılması ve bitirilmesi mümkün değildir. Kurutmanın diğer avantajları arasında ağırlık azaltma, artan mukavemet özellikleri, mantar ve böceklerden kaynaklanan biyolojik bozulmaya karşı daha fazla direnç yer alır. Bu nedenle, daha sonraki imalatlarda herhangi bir uygulama için kullanılmadan önce kereste kurutulmalıdır. Bu bilgi, fırında ahşap kurutmanın temellerini, en sık kullanılan yöntemleri, kurutma programlarını ve bazı kurutma kusurlarını özetlemektedir. Ayrıca bu çalışmada geleneksel, nem alma ve vakum fırınları ayrıntılı bir şekilde incelenmiş olup kurutma aşamaları üzerine çalışma yapılmıştır.

Bell ve ark. [17] endüstriyel enerji davranışlarına ilişkin bu çalışmalarında, Yeni Zelanda kereste endüstrisinde enerji tasarruflu kurutma teknolojisi kullanımının önündeki engelleri belirlemekte ve bu engelleri "enerji kültürleri" merceğinden araştırmışlardır. Havalandırmalı fırınlı kurutucular daha büyük firmalar tarafından, ısı pompalı fırınlı kurutucular daha küçük firmalar tarafından tercih edilmektedir. Çok az firma tüm maliyetlerini belirtebilse de daha büyük ve küçük firmaların ortalama işletme maliyetleri, kurutma maliyetleri veya ticari başarıları arasında önemli bir fark bulunamamıştır. Sosyo-teknik engellerin hem firma hem de sektör düzeyinde "enerji kültürü" yarattığı ve bacalı fırın kurutucuların hakimiyetini desteklediği görülmüştür. Sektör düzeyindeki hakim teknolojiler, uygulamalar ve normlar havalandırmalı fırınları güçlü bir şekilde desteklemektedir. Sosyo-teknik bağlama gömülü statüko, teknolojik öğrenmeyi, gelişmiş enerji verimliliğini ve yeniliği engellemektedir. Endüstri çapında enerji kültürü ve değişimi etkileyecek bir konumda değildir. Mevcut endüstri enerji kültürünün dışındaki aktörlerin, enerji verimli kurutma teknolojisinin avantajlarından yararlanmak, sürekli gelişimine yardımcı olmak ve yola bağımlılık risklerinden kaçınmak için endüstri normlarında, uygulamalarında ve/veya teknolojilerinde değişiklikten yararlanmaları gerektiği sonucuna varılmıştır.

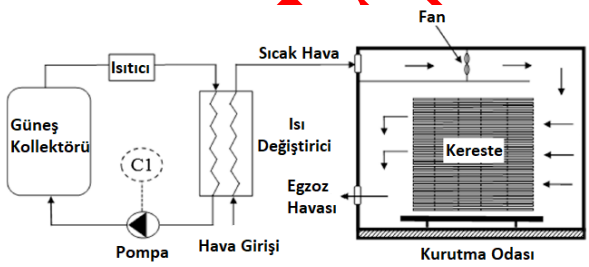
Zadin ve ark. [18] çalışmalarında, endüstriyel ahşap kurutma sürecini ve çok ölçekli çoklu fizik modelleme çerçevesinde fırınların tasarımını simüle ve optimize etmek için sonlu elemanlar simülasyonuna dayalı bir yaklaşım kullanmışlardır. Konvektif bir ahşap kurutma fırınındaki kurutma dinamikleri simüle edilmiştir. Simülasyonlar, önceden talep edilen inşaat kısıtlamaları tarafından motive edilen iki farklı fırın geometrisi için gerçekleştirilmiştir. Kurutulmuş malzemedeki hava akışını ve nem dinamiklerini simüle etmeye yönelik geometrik zorluklar, gözenekli malzeme yaklaşımı kullanılarak kurutma malzemesi bölgesinde çok ölçekli bir yaklaşım uygulanarak başarılı bir şekilde aşılmıştır. Simülasyonlar, kurutma odasındaki hava akışı hesaplamaları ile başlatılmış, ardından sıcaklık ve hava nemine bağlı ahşap kurutma simülasyonlarında tam eşleşmiş konvektif ısı ve nemli hava taşınması ile devam etmiştir. Kurutma dinamiği hesaplamaları, fırının geometrik optimizasyonu uygulaması ile takip edilmiştir. Kurutma dinamiklerinin parametrik incelemeleri, bu fırın tasarımları için optimum havalandırma hızlarının 5-6 m/s olduğunu göstermiştir. Geometri optimizasyonu kurutma alanında tekdüze hava akış profiline ulaşılmasını sağlamıştır. Sonuç olarak, endüstriyel ahşap kurutma fırınlarının tasarımını simüle etmek ve optimize etmek için multi-fizik çok ölçekli simülasyonlar başarıyla uygulanmıştır. Optimize edilmiş koşullar gerekli havalandırma gücünü tahmin ederken, işlenen malzemenin homojen bir şekilde kurutulmasını sağlayan fırın tasarım maliyetinin en aza indirilmesini sağlamıştır.

Fuwape ve ark. [19] çalışmalarında, güneş enerji destekli kereste kurutma fırının inşa edilmesi ve verimliliğinin değerlendirilmesi üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. 3 x 24 m^3 kereste sezonlama kapasiteli bir güneş kereste fırını tasarlanmış, inşa edilmiş ve ticari kereste kurutma için kullanılmıştır. Fırın, üstte şeffaf polietilen levha ve yanlarda siyah deri kaplı ahşap bir çerçeveden yapılmıştır. Oluklu galvanizli sac siyah boyalı ve yataya 30° eğimli ısı toplayıcı görevi görmüştür. Hava sirkülasyonu için iki adet fan takılmıştır. Fırın, ortam sıcaklığının maksimum 24°C üzerinde bir sıcaklığa ulaşmıştır. Isı toplayıcının ortalama verimliliği %38,5 olarak ölçülmüştür. Güneş fırını, doğal kurutma tekniğiyle karşılaştırıldığında kereste kuruma süresini

ERKEN GÖRÜNÜM

%33,3-57,1 oranında azaltmıştır. Mansonia Altissima ve Terminalia Superba'nın keresteleri (2,5 cm x 30 cm x 36 cm) 12 gün içinde sırasıyla %46,16'dan %15,02'ye ve %52'den %15,4'e kurutulmuştur.

Lamrani ve ark. [20] Şekil 8'deki çalışmalarında, enerji simülasyon yazılımı kullanılarak dolaylı bir hibrit güneş enerjisi kurutma makinesinin performansının araştırılması için yeni bir sayısal model geliştirmişlerdir. Sistemin çalışma süresi boyunca güneş kolektörü tarafından elde edilen ısı enerjisi bir eşanjör vasıtasıyla ısısını sekonder devredeki havaya aktarmıştır. Isıtılan hava, ısı eşanjöründen çıkıp kurutma odasına üflenmiştir. Kütle akış hızını kontrol etmek ve sıcak havayı ahşap levha katmanları arasında dolaştırmak için bir fan kullanılmıştır. Güneşlenme süreci bu sistemin çalışması için yeterli olmadığında, ek bir ısıtıcı kaynak kullanılmıştır. Kurutma süresi boyunca (8.00 – 18.00) kurutma odasına gerekli giriş sıcaklığının 110°C/60°C (kuru hazne/yaş hazne) olduğu varsayılmıştır. Sistemin çalışmadığı süre boyunca, kontrolör kullanılarak pompa ve yardımcı ısıtıcı sistem kapatılmaktadır. Bu nedenle, kurutma odasının girişindeki kurutma havasının sıcaklığı ve bağıl nemi, ortam havasının sıcaklık ve bağıl nemine eşitlenmektedir. Aralıklı çalışmayı gerçekleştirmek için, çalışma süresine göre ısı transferi akışını durdurmak veya başlatmak için bir kontrolör kullanılmıştır. Kereste sıcaklığı, kurutma havası sıcaklığına göre periyodik olarak değişmiştir. Kereste nem içeriğinin 0,7'den 0,1 kg su/kg kuru madde değerine düşmesi için gereken süre yaklaşık 84 saat olarak bulunmuştur. Tangier şehri için kolektör eğiminin 35,7° olması gerektiği hesaplanmıştır. Güneş kolektörünün kereste kurutma sistemine entegrasyonu, enerji tüketiminin azalmasını ve yıllık yaklaşık %34 oranında karbondioksit (CO_2) emisyonu salımının önlenmesini sağlamıştır. Ek ısı kaynağı ise kış aylarında maksimum yükte çalışırken, yaz aylarında minimum yükte çalışmıştır.



Şekil 8. Kurutma çevrimi akış şeması (Drying cycle flow schema)

Salin [21] çalışmasında, son 30 yılda ahşap kurutma modellemesinin tarihi bir özetini sunmuştur. Karşılaşılan bazı sorunlar ve çözümler tartışılmıştır. Son olarak, gelecekte çözülmesi gereken bazı kalan problemler sunulmuştur. Kişisel bilgisayarlar yaygın olarak bulununca modelleme işi güçlü bir şekilde artmıştır. Fick denklemlerinin sayısal çözümleri kolaylaşmış ve kurutma işleminin ilk umut verici simülasyonları sunulmuştur. Modeller, difüzyon katsayısı gibi malzeme parametreleri için sayısal değerler gerektirmiş ve test sonuçlarıyla iyi bir uyum sağlayabilmek adına değerleri uyarlamak için kullanılmıştır. Isı ve kütle transferi bu konuda uzun süre tartışma konusu olmuştur. Ne yazık ki, pratik açıdan yararsız olduğu ortaya çıkan yüzey emisyonu kavramına çok fazla çalışma yapılmıştır. Bu alandaki diğer bir sorun, ısı ve kütle transferi arasındaki analojiden görünen sapmalar olmuştur. Nem alma modellemesi makul bir doğruluk düzeyine ulaştığından, odak noktası nemin neden olduğu stresin hesaplanmasına çevrilmiştir. Başlangıçta, yalnızca düşük sıcaklıkta, tek kartlı modeller geliştirilmiş ancak kademeli olarak fırın çapında modeller, enerji tüketimi, kurutma maliyetleri, deformasyonlar ve kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklar gibi diğer alanlar da dahil edilmiştir. Hâlâ araştırma ve geliştirme gerektiren alanlar arasında kılcal ağdaki serbest su davranışının modellenmesi, sorpsiyon histerezisinin dahil edilmesi, çevresel etki ve renk bozulmasının modellenmesi yer almaktadır. Son olarak, fırın operatörleri için kullanımı kolay modeller ve fırın kontrol sistemlerinde gömülü modeller şeklinde teknoloji transferinin öneminin vurgulanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

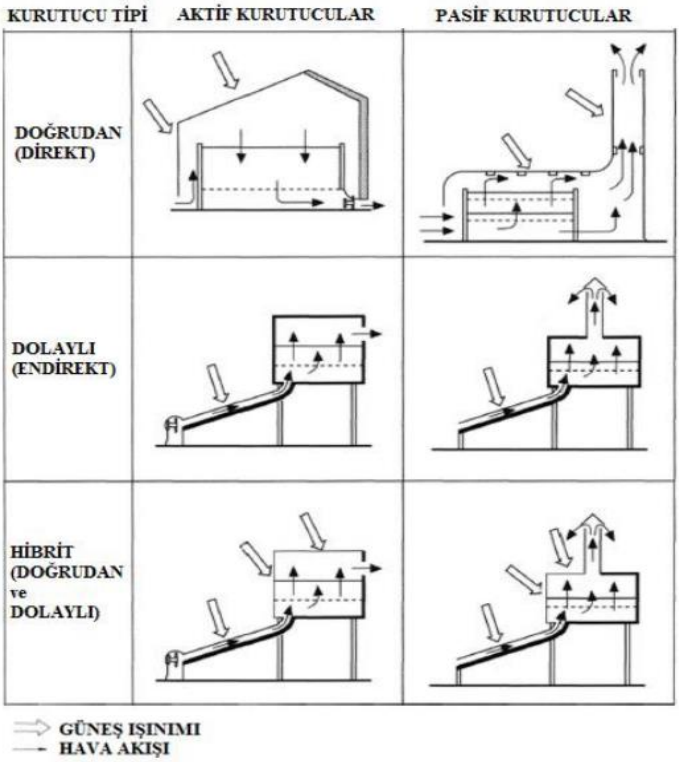
Özalp ve Ordu [22], çalışmalarında kereste kurutmada kullanılan enerji kaynaklarının maliyetlere etkisi üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Fosil yakıtlar günümüzde enerji ihtiyaçlarının büyük bir kısmını karşılamaktadır. Fosil yakıtlara alternatif yenilenebilir bir kaynak olan jeotermal enerji, ısıtma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde enerji kaynaklarının giderek tükenmesi ve maliyetlerinin artması jeotermal enerji kaynaklarına yönelimi artırmaktadır. 240 m^3 kapasiteli kereste kurutma fırını örnek alınarak jeotermal enerji kaynağı için analizler yapılmıştır. Yapılan analizlere istinaden kurutma fırınında jeotermal enerji kaynağının kullanılması sırasındaki tüketimin sırasıyla kömürden 5 kat, fueloilden 13 kat ve elektrik enerjisinden 36 kat daha az olduğu sonucuna varılmıştır. Bu da alternatif enerji kaynağı olarak jeotermal enerjinin kullanılmasının tesis verimliliği ve tüketimi açısında oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca amortisman sürelerinin de kısa olması bu uygulamalarda jeotermal enerjinin kullanımını artıracağını göstermiştir. Çevreci, yenilenebilir, ekonomik ve güvenli bir enerji kaynağıdır. Karbon ayak izi ve iklim değişikliği gibi konuların öneminin giderek artması ülkeleri kömür, fueloil gibi kaynakların tüketimini azaltarak jeotermal enerji gibi alternatif kaynaklara yöneltmektedir. Bu yüzden yapılan çalışmada jeotermal enerji kaynağının kullanılmasının daha verimli olacağı sonucuna varılmıştır.

Bakır [23] çalışmasında, kereste kurutulmasının deneysel ve matematiksel incelenmesi üzerine incelemelerde bulunmuştur. Kayın, çam, kavak ve ceviz olarak 4 çeşit kereste numunesinin kurutulması deneysel olarak yapılmıştır. Bu deney çalışması her ağaç türünden 5 adet numune alınarak gerçekleştirmiştir. Yapılan deneylerde her kereste türüne göre nem miktarları, hava hızları,

ÖN GÖRÜNÜM

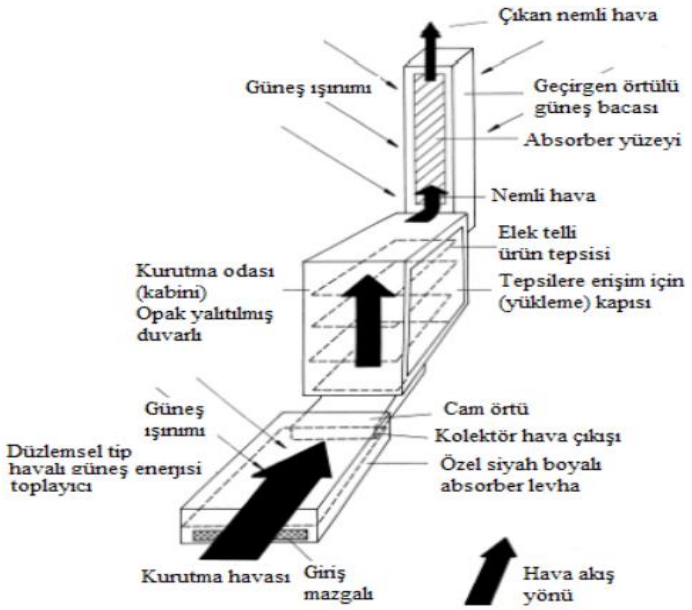
kuruma süreleri, kuruma hızları, ısı ve kütle değişimleri grafiğe geçirilmiştir. Tüm kereste türlerine ait nem değerlerinin zamanla azaldığı görülmüştür. Nem miktarının yüksek olduğu kurutmanın ilk aşamalarında nem almanın hızlı, üründeki nem miktarı azaldığında ise nem almanın yavaşladığı sonucuna varılmıştır. Ürünlere ait kuruma hızları ayrı ayrı grafiksel olarak gösterilmiştir. Ürünlerin çoğunda kuruma, kurutmanın ilk 50 dakikasında hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. 50-100 dakika arasında çok az bir düşüş görülmüştür. 100 dakika ve daha sonrasında üzerinde durulmayacak bir düşüş gerçekleşmiştir.

Güneş enerjili kurutma sistemlerinde güneş ışınları, kolektördeki havayı ısıtır. Isıtılan hava doğal ya da yapay yollarla sağlanan hava akışı ile kurutma odasına girer. Burada, havanın ürünün nemini uzaklaştırmasıyla kurutma işlemi gerçekleştirilmiş olur. Güneş enerjisi ile kurutma sistemleri direkt, endirekt ve bu iki sistemin hibrit edilmesi ile 3'e ayrılmaktadır. Bu sistemlerin çalışması, güneş enerjisini toplayıp bu enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek gerçekleşmektedir. Güneş enerjili kurutma sistemleri güneş enerjisini kullanma şekillerine ve ısıtma modlarına göre sınıflandırılırlar [24, 25]. Çeşitli güneş enerjili kurutucu tasarımları Şekil 9'da gösterilmektedir [26].



Şekil 9. Güneş enerjili kurutucu tasarımları (Solar dryer designs)

Dolaylı tip pasif güneş enerjili kurutucularda doğal taşınım ile hava sirkülasyonu sağlanır. Şekil 10'da görüldüğü gibi aralarında boşluk bırakılarak üst üste dizilen tepsiler dikey raflara yerleştirilerek kurutucunun kapasitesinin artırılması sağlanır. Fırın içerisine tepsiler yerleştirildiğinde içeriye üflenen hava daha fazla dirençle karşılaşır. Bu direnci yenebilmesi için gerekli olan hava hareketine baca etkisi denir. Baca etkisi fırın içerisine üflenen hava ile atmosfer havası arasındaki sıcaklık farkından dolayı gerçekleşir [27].

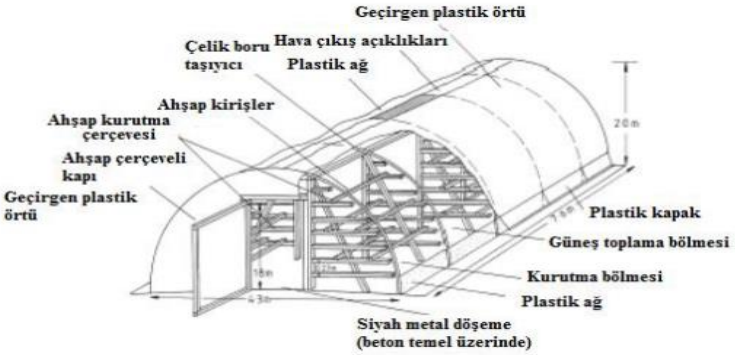


Şekil 10. Dolaylı tip güneş enerji destekli kurutucu (Indirect type solar assisted dryer)

Doğrudan tip pasif güneş enerjili kurutucularda kurutulacak olan ürün güneş ışığına doğrudan maruz bırakılır. Üzüm, hurma, kahve ve kavrulmuş çekirdeklerde bu yöntem ürünün renk olgunlaşmasını sağlayarak lezzetini arttırır. Kabin tipi ve sera tipi kurutucular doğrudan tip pasif kurutuculardır.

Kabin tipi kurutucular eğimli bir kapak, saydam yüzey, yalıtımlı yüzey ve tabandan oluşurlar. Tabanında, ön ve arka kenarlarında havalandırma amacıyla açılmış delikler bulunur. Kurutma havası bu deliklerden girerek ürünle temas eder. Daha sonrasında ısınan hava yükselerek atmosfere bırakılır. Güneş ışınları siyah yüzeylerde daha çok soğurulduğu için kurutma odasının yüzeyleri siyah renge boyanmaktadır [27].

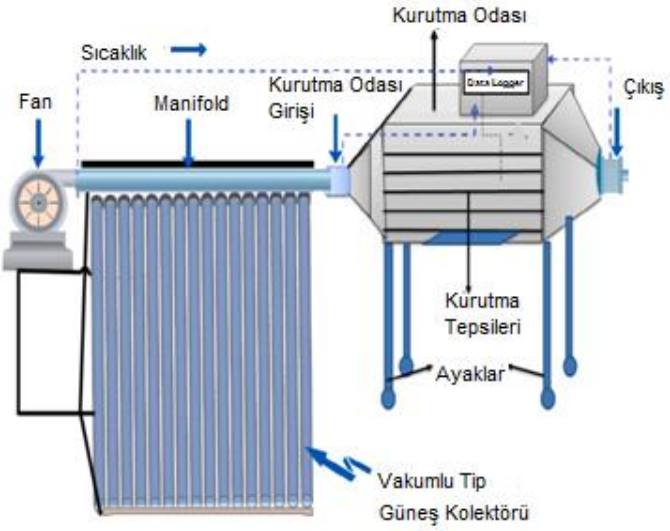
Çadır kurutucu olarak da adlandırılabilen sera tipi kurutucular, uygun boyut ve pozisyondaki havalandırma menfezleri ile kontrollü bir hava akışına sahip kurutuculardır. Şekil 11'de örnek bir sera tipi kurutucu gösterilmiştir [28].



Şekil 11. Sera tipi kurutma sistemi (Greenhouse type drying system)

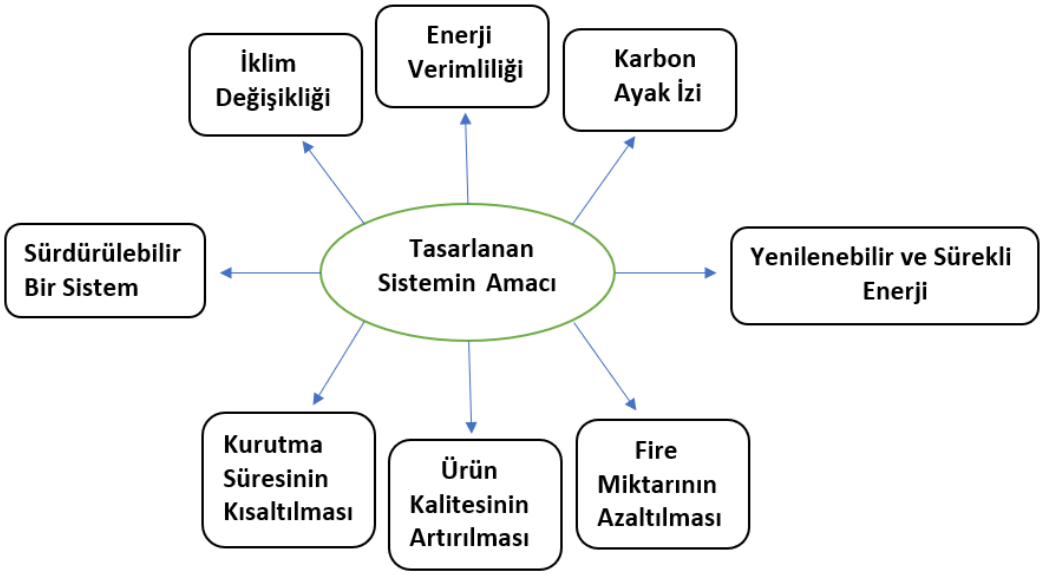
Vakumlu tip güneş enerji destekli kurutma sistemlerinde fan gibi harici ekipmanlar kullanılır. Kurutma odasına gönderilecek hava güneş enerjisi ile ısıtılır. Isınan hava fan yardımı ile kurutma odasına gönderilir. Bu şekilde kurutma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 12'de örnek bir vakumlu tip güneş enerjili kurutucu gösterilmiştir [29].

ERİŞİMİNGÖRÜLÜM



Şekil 12. Vakumlu tip güneş enerjili kurutucunun şematik resmi (Schematic picture of evacuated tube solar dryer)

Bu çalışma kapsamında yapılan tasarımın amacına ilişkin detaylar Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Tasarlanan sistemin amacı (The purpose of designed system)

Bu çalışma

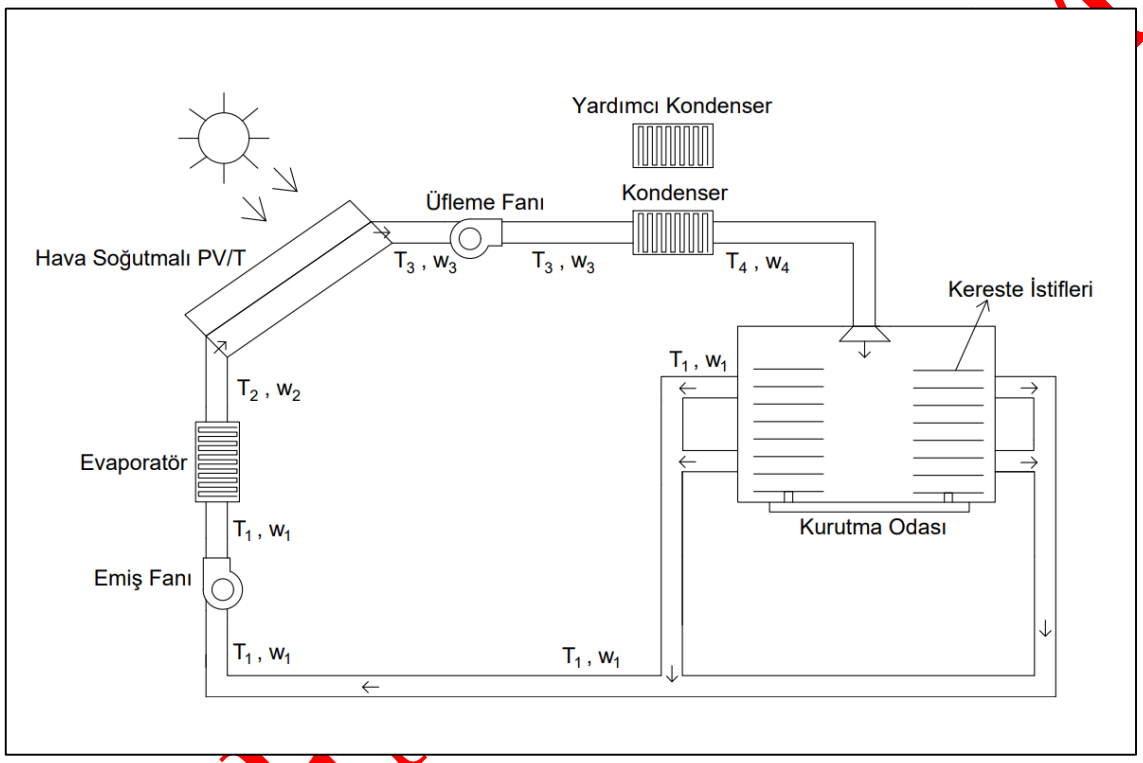
- Hammadde ve enerji maliyetlerinin giderek artmasından dolayı enerjisini verimli kullanan eko bir sistem tasarlamak,
- Yenilebilir bir enerji kaynağı kullanarak çevreye olan olumsuz etkileri azaltmak,
- Enerjisini depolayan bir sistem ile kurutma işleminin devamlılığını sağlamak,
- Kereste kurutma kusurlarını göz önünde bulundurarak sıcaklık ve bağıl nem kontrollü kurutma sağlamak,
- Ahşap malzemeden istenilen verimliliğin sağlanması, dayanıklılığın ve ürün kalitesinin artırılması için doğru koşullarda kurutma yapılmasına katkı sağlamak

amaçları için yapılmıştır.

2. TASARIM (DESIGN)

Kereste, sıcaklık ve bağıl nem kontrollü bir sistem ile kurutulduğunda kurutma kusurları azalan bir üründür. Kerestenin cinsine ve boyutlarına göre kurutma

havasının sıcaklık ve bağıl nem değerleri tasarımı yapılan sistem ile kontrollü bir şekilde ayarlanacaktır. PV/T sistemlerinde öncelik elektrik üretimidir. Bu sistemlerin yüksek sıcaklıkta verimlerinin düştüğü bilinmektedir. Havalı PV/T sistemlerinde yapı malzemesi ile panel arasından ısı taşıyıcı akışkan olan hava geçirildiğinde, havanın ön ısıtılması ile termal enerji elde edilerek diğer panel soğutulmuş olacaktır. Böylece kapalı çevrime ve hava soğutmalı PV/T'ye sahip bu sistemde PV soğutulduğu için elektriksel verim yükselecektir. Bağıl nem ve sıcaklık kontrollü olan bu sistem, aküde depoladığı enerjiyle 24 saat kesintisiz çalışabilecektir. Panelde üretilen enerji akü grubunda depolanmakta ve güneşin olmadığı zamanlarda kurutma işlemi bu depolanan enerji yardımıyla devam etmektedir. Bu sayede kendi enerjisini üreten yeni tip enerji depolamalı ve enerjinin etkin bir şekilde kullanıldığı bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistem katı atık yakma tesisleri ile hibritlenerek geliştirilebilir. Şekil 14'te tasarımı yapılan sistem gösterilmiştir.



Şekil 14. Eko tasarımlı güneş enerjili kereste kurutma sisteminin tasarımı (Design of eco-design solar timber drying system)

Güneş enerjili ve enerji depolamalı bu sistem; güneş kolektörü, fan, kondenser, evaporatör, kompresör, kurutma odası ve akü grubundan oluşmaktadır. Deney sistemi, kolektörden alınan sıcak havanın kurutma odasına üflenip kapalı bir çevrim ile egzoz havasının tekrar kolektöre gönderileceği bir şekilde tasarlanmıştır. Sıcaklık ve bağıl nem kontrolü, egzoz havası ve kurutma odasına üflenecek hava için yapılmaktadır. Kurutma odası içerisinde kerestelerle temas eden kurutma havasının bağıl nem değeri yükselmektedir. Nem değeri artan kurutma havasının nem alma kabiliyeti de azalacağı için oda içerisinden egzoz edilmektedir. Egzoz edilen hava, nem değeri düşürülmeden doğrudan kolektörde ısıtılarak kurutma odasına gönderilirse üzerine daha fazla nem alamayacağı için kurutma sürelerinin uzamasına ve ürün kalitesinin düşmesine neden olacaktır. Bu yüzden egzoz havasının kurutma odası çıkışında bağıl nem değeri kontrol edilerek ısı pompasının evaporatöründe nem alma yapılmaktadır. Isı pompası sistemi güneş varken doğrudan bu enerji ile çalışırken, güneşin olmadığı zamanlarda akü grubunda depolanan enerji ile çalışmasına devam etmektedir. Nemi alınan havanın düşük sıcaklıklarda PV/T panelde soğutma yapmasıyla da panelin elektriksel verimliliği artacaktır. Daha sonra kolektörde ısıtılan hava fan yardımı ile kondensere gönderilmektedir. Kolektörden çıkan kurutma havasının daha fazla ısıtılması gerektiğinde ısı pompası sisteminin ana kondenserinden atılan ısı ile havanın ısıtılması sağlanmaktadır. Yardımcı kondenser ise PV/T sıcaklığına göre ısıtma ihtiyacı olmadığında devreye girecektir. Kurutulacak kerestelere zarar verecek diğer durum ise hava hızlarıdır. Kurutma odası içerisinde çok noktadan alttan ve üstten emiş yapılarak ve dolayısıyla homojen bir hava akışı sağlanarak tüm ürünlerde homojen kurutma sağlanacaktır. Bu yüzden fan yardımı ile kurutma odasına üflenecek hava hızları ayarlanarak, hava akışı yönünde kerestelere homojen hava nüfuz edecek ve tüm keresteler için homojen kurutma elde

edilecektir. Bu sayede kuruma esnasında ve sonrasında da kerestelerde daha homojen nem içeriği sağlanabilecektir. Böylece kurutma sonunda daha kaliteli kurutulmuş ürünler elde edilebilecektir. Güneş enerjisi ile akülerde depolanan enerjinin de ihtiyaç halinde kompresörün, fanların ve diğer ekipmanların çalışmasını sağlamasıyla şebekeden bağımsız, enerji verimliliğini ve ürün kalitesini artırabilecek bir tasarım ortaya konmuştur.

3. ENERJİ ANALİZİ (ENERGY ANALYSIS)

Bu sistemdeki elektrik enerjisi tüketimi kompresör, fan ve diğer ekipmanlarda gerçekleşmektedir. Termodinamiğin 1. yasası olan enerjinin korunumu yasasına göre güneş kolektörünün ürettiği enerji fanların, kompresörün ve diğer ekipmanların harcadığı enerjiye eşittir ve denklem (1,2) kullanılarak hesaplanabilir [30]:

$$\sum \dot{E}_g = \sum \dot{E}_ç \tag{1}$$

$$PV_{solar} = \dot{W}_{fan1} + \dot{W}_{fan2} + \dot{W}_{kompresör} + \dot{W}_{depolanan\ enerji} + \dot{W}_{diğer} \tag{2}$$

Fan gücü hava debisi ve basınca bağlıdır. $\dot{V}$ hava debisindeki ve ΔP_t basıcındaki bir fan gücü denklem (3) kullanılarak hesaplanabilir [31]:

$$\dot{W}_{fan} = \frac{\dot{V}\ x\ \Delta P_t}{\eta_{fan}} \tag{3}$$

Isı pompası sistemindeki evaporatör kapasitesi denklem (4) kullanılarak hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{evaporatör} = \dot{m}(h_1 - h_4) \tag{4}$$

Ayrıca sistemdeki kondenser kapasitesi ise denklem (5) kullanılarak hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{kondenser} = \dot{m}(h_2 - h_3) \tag{5}$$

Isı pompasının etkinlik katsayısı denklem (6) kullanılarak hesaplanabilir [32]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{kondenser}}{\dot{W}_{kompresör}} \tag{6}$$

Fotovoltaik termal (PV/T) güneş panelinin verimi elektriksel verim ile termal verimin toplamına eşittir. Bir panelin elektriksel verimi denklem (7) kullanılarak hesaplanabilir [33]:

$$\eta_{elektriksel} = \frac{V_{MPP}\ x\ I_{MPP}}{A\ x\ G} \tag{7}$$

Panelin termal verimi ise denklem (8) kullanılarak hesaplanabilir [34]:

$$\eta_{termal} = \frac{\dot{m}_h\ x\ c_p\ x\ (T_ç - T_g)}{A\ x\ G} \tag{8}$$

Bu durumda bir PV/T panelin toplam verimi denklem (9) kullanılarak hesaplanabilir:

$$\eta_{PV/T} = \frac{[(V_{MPP}\ x\ I_{MPP}) + (\dot{m}_h\ x\ c_p\ x\ (T_ç - T_g))]}{A\ x\ I} \tag{9}$$

Kurutulacak maddeden 1 kg su çekmek için kullanılan enerji miktarı olan özgül nem çekme oranı (ÖNÇO), işletme maliyetleri açısından oldukça önemlidir. Denklem (10) kullanılarak hesaplanabilir [35]:

$$ÖNÇO = \frac{\dot{m}_{su}}{\dot{W}_{fan1} + \dot{W}_{fan2} + \dot{W}_{kompresör} + \dot{W}_{diğer}} \tag{10}$$

Ürünlerin kuru bazdaki nem içeriği denklem (11) kullanılarak hesaplanabilir [36]:

$$MC_{db} = \frac{M_i - M_d}{M_d} \tag{11}$$

Evaporatörde havadan çekilen nem denklem (12):

$$\dot{W}_{evaporatör} = \dot{V}\rho(w_1 - w_2) \tag{12}$$

Kurutma odasında üründen çekilen nem ise denklem (13) kullanılarak hesaplanabilir:

$$\dot{W}_{kurutma\ odası} = \dot{V}\rho(w_1 - w_4) \tag{13}$$

Evaporatörün havadan çektiği nem ile kurutma odasında üründen çekilen nem miktarı birbirine eşittir. Bu durumda denklem (14) eşitliği yazılabilir:

$$\dot{V}\rho(w_1 - w_2) = \dot{V}\rho(w_1 - w_4) \tag{14}$$

Buradan denklem (15) eşitliği elde edilir:

$$w_1 - w_2 = w_1 - w_4 \qquad w_2 = w_4 \tag{15}$$

ERKEN GÖRÜNÜM

4. METOT VE SİSTEM ANALİZİ (METHOD AND SYSTEM ANALYSIS)

Çizelge 1'de geleneksel kurutma sistemlerinde karşılaşılan sorunlar, bulgular ve tasarımı yapılan sistem ile bu sorunların önüne nasıl geçildiği hakkında bilgi verilmektedir.

Çizelge 1. Kurutma sistemlerindeki sorunlar, tasarımın enerji verimliliği ve kurutma kalitesine etkileri (Problems in drying systems, the effects of design on energy efficiency and drying quality)

Sorunlar	Bulgular	Tasarlanan Sistemin Etkileri
Ürün kusurları ve kalitesi	Kereste kurutma uygulamalarındaki kurutma havasının sıcaklık ve bağıl nem değerleri çok önemlidir. Bu değişkenler kontrol edilmeden kurutma odasına gönderilirse kerestelerde çatlaklar, deformasyonlar, hücre çökelmeleri, reçine sızması, renk ve şekil değişimleri gibi kusurlar oluşur [37, 38, 39, 40, 41, 42].	Bu tasarım ile kurutma odasına giriş ve çıkıştaki havanın sıcaklık ve bağıl nem değerleri ölçülmektedir. Kereste türlerine göre kurutma sıcaklıkları değişmektedir. Tasarlanan sistemde kurutma odasındaki koşullar ürün türüne göre ayarlanmaktadır. Böylece ürünlerde fire miktarı azaltılarak ürün kalitesi artırılmaktadır. Ayrıca kerestelerin kurutma sırasında kalitelerinin bozulmaması için anlık yüzey sıcaklıkları ısıl çiftler kullanılarak ölçülmektedir.
Kurutma süresi ve kurutma havasının dağılımı	Kurutma odasının değişik noktalarında hava hızlarının farklı olması ve hava dağılımının homojen olmaması özellikle lif doygunluk noktası üzerindeki rutubet değerlerinde dengesiz kurumalara ve kurutma sürelerinin uzamasına neden olmaktadır [43, 44].	Kurutma odasına nem değeri yüksek bir havanın verilmesi kurutma sürelerini uzatmaktadır. Tasarlanan sistem ile egzoz havasının evaporatörde nemi alınmaktadır. Bu da havanın kerestelerden daha fazla nem çekmesini sağlamaktadır. Keresteler kurutma odası içerisinde belli bir düzende ve hava akış yönünde dizilmektedir. Kurutma odasına gönderilecek hava hızları fan yardımı ile ayarlanarak tüm kerestelerde homojen kurutma ve nem içeriği sağlanmaktadır.
Enerji verimliliği	Hammadde, işçilik ve enerji maliyetlerinin giderek artması kurutma uygulamalarında geleneksel sistemlerin kullanılmaya devam edilmesi ve sistemde kullanılan fan, damper, kompresör gibi ekipmanların frekans kontrolsüz olması enerji tüketimlerinin giderek artmasına neden olmaktadır. Ayrıca kullanılan PV/T sistemlerin yüksek sıcaklıklara çıkması elektriksel verimliliği düşürmektedir. Bu yüzden panellerin soğutulması sistem ve enerji verimliliği açısından çok önemlidir [45].	Havalı PV/T sistem ile bir yandan havanın ön ısıtması yapılırken diğer yandan panel soğutulmaktadır. Böylece sistemin elektriksel verimliliği artırılmaktadır. Güneş varken elde edilen elektrik enerjisi akü grubunda depolanmaktadır. Tasarlanan proseste akü grubunda depolanan bu enerji ile 24 saat çalışabilecek şebekeden bağımsız, temiz, yenilenebilir ve çevreci bir eko tasarım elde edilmektedir. Böylece enerji verimliliği arttırılarak enerjisini etkin kullanan, karbon emisyon değerlerini azaltan sürdürülebilir bir sistem elde edilmektedir.

Üründen 1 kg nem çekebilmek için kWh cinsinden tüketilecek enerji miktarına özgül enerji tüketimi denir. Bu değer kritik bir öneme sahip olup Çizelge 2'de kurutma uygulamalarında baz alınan değerler verilmiştir. Literatürdeki bu değerler ışığında tasarımı yapılan sistem için özgül enerji tüketimi değeri 3,03 kWh/kg su olarak alınmıştır.

ERKEN GÖRÜNÜM

Çizelge 2. Literatürdeki özgül enerji tüketim değerleri (Specific energy consumption values in the literature)

Yazarlar	Çalışma Türü	Özgül Enerji Tüketimi (kWh/kg)
Milić ve ark. [46]	Kurutma	3,00
Lawrence ve ark. [47]	Kurutma	3,33
Khurshid ve ark. [48]	Kurutma	3,03
Motevali ve ark. [49]	Kurutma	2,51

Günümüzde hammadde sıkıntılarının yaşanması ve enerji maliyetlerinin yükselmesinden dolayı kullanılan proseslerin verimliliklerin arttırılması ve fire miktarlarının azaltılması gerekmektedir. Bu yüzden literatür çalışmaları ışığında bu çalışma yapılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Kereste kurutma uygulamalarında kurutulmuş ürün kusurları, kurutma süreleri ve enerji verimliliği kriterleri önemlidir. Literatürde bu kriterlerin bir arada bulunduğu çalışmalar kısıtlıdır. Bu çalışmada, kerestenin güneş enerjisi ile farklı koşularda sürdürülebilir bir sistem ile kurutulmasına yönelik yeni bir eko tasarım yapılmıştır. Geleneksel kurutma sistemlerinde kereste türlerine göre kurutma koşullarının belirlenememesi ya da uygulanmaması sonucunda çatlaklar, reçine sızmaları, renk bozulması, şekil değişimleri, hücre çökelmeleri, deformasyonlar ve çarpılma gibi kereste kusurları meydana getirmektedir. Kurutulacak kereste türlerine göre kurutma odası girişinde sıcaklık ve bağıl nem kontrolü yapılarak koşullar belirlenmektedir. Ürün kusurları ve kurutma süreleri ise kabin içerisindeki her noktada uniform bir akış sağlanarak azaltılabilecektir. Yapılan tasarımda havanın üfleme-emiş yapısı ve bunun yanında kerestelerin hava akış yönünde belli bir düzende dizilmesi ile homojen kurutma ve nem içeriği sağlanabilecektir.

Güneşin olduğu zamanlarda güneş panelinde üretilen enerji akü grubunda depolanacaktır. Güneşin olmadığı zamanlarda kompresör ve fanlar depolanan enerji ile çalıştırılarak sistemin devamlılığı sağlanacaktır. Uygulama sıcaklıkları yükseldiğinde ve panel soğutulmadığında panelin elektriksel verimliliği düşmektedir. Tasarlanan sistemin 24 saat çalışabilmesi için PV/T sistemlerinin verimli olması büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden egzoz edilen hava ilk önce evaporatöre girecek, burada nemi ve sıcaklığı düşürülecektir. Bu kapsamda:

- Sıcaklığı düşürülen hava panele daha soğuk girdiği için panelin elektriksel verimliliği artacaktır. Ayrıca havanın PV/T ile ön ısıtılması da sağlanacaktır.
- Isı pompası sisteminin ana kondenserinde ise ısıtma ihtiyacı olduğunda atık ısı ile hava ısıtılacaktır.
- Yardımcı kondenser ise havanın PV/T'den çıkış sıcaklığına göre ısıtma ihtiyacı olduğunda devreye girecektir. Böylece ısı pompası sisteminde hem nem alma hem de ısıtma yapılmış olacaktır. Bu da tasarlanan sistemin enerjisini etkin ve verimli kullandığını göstermektedir. Böylece konvansiyonel kaynak kullanılmadan güneş enerjili ve enerji depolamalı bu sistem ile kurutma işleminin sürekliliği sağlanmıştır. Ayrıca şebekeden bağımsız ve yenilenebilir enerjinin kullanıldığı bu sistem, enerji verimliliğinin yanı sıra karbon emisyon ve çevre kirliliği değerlerinin azaltılmasını da sağlamaktadır.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nca hesaplanan 1 MWh net elektrik tüketimi başına ortalama 0,44 ton CO_2-eşdeğer sera gazı emisyonu salımı değerine göre [50] bu tasarım kapsamında kurutulacak olan üründen 1 ton nem alınması durumunda 1,33 ton CO_2-eşdeğer sera gazı emisyonu salımı önlenmiş olacaktır. Bu kapsamda 0 CO_2 salım değeri hedefi gerçekleştirilecektir.
- Tasarlanan bu sistem enerji maliyetinin azaltılması yönü ile kurutucunun işletme giderlerinin düşürülmesine katkı sağlayacaktır.

Bu eko tasarım uygulandığında Paris İklim Anlaşması'nın hedeflerinin gerçekleşmesine katkı sağlayacaktır. Bu tasarıma harici kondenserden ısı atılacağı durumlarda termal enerji depolama modülü eklenerek verimlilik daha da artırılabilir. Kendi enerjisini üreten, çevreci, kurutma sürelerini kısaltan ve enerjisini verimli kullanan bir sistem olması daha sonraki çalışmalara önemli ölçüde katkılar sağlayacaktır.

ERKEN GÖRÜNÜM

SEMBOLLER (SYMBOLS)

A	Güneş panelinin yüzey alanı, m^2
ΔP_t	Basınç, N/m^2
COP	Isı pompasının etkinlik katsayısı
c_p	Özgül ısı, kJ/kg°C
$\dot{E}_g$	Birim zamanda giren enerji, kW
$\dot{E}_ç$	Birim zamanda çıkan enerji, kW
G	Güneş panelinin birim alanına düşen ışınım miktarı, W/m^2
h	Entalpi, kJ/kg
I_{MPP}	Güneş panelinin maksimum güç noktasındaki akım değeri, A
MC_{db}	Kuru baza göre nem içeriği, g su/kg kuru madde
M_i	Başlangıçtaki yaş ağırlık, g
M_d	Kuru ağırlık, g
$\dot{m}$	Kütlesel debi, kg/s
ÖNÇO	Üründen 1 kg su alabilmek için harcanan enerji miktarı (özgül nem çekme oranı), kg su/kWh
$\dot{Q}_{evaporatör}$	Evaporatör gücü, kW
$\dot{Q}_{kondenser}$	Kondenser gücü, kW
T_G	Giriş sıcaklığı, °C
$T_Ç$	Çıkış sıcaklığı, °C
$\dot{V}$	Hava debisi, m^3/s
V_{MPP}	Güneş panelinin maksimum güç noktasındaki gerilim değeri, V
$\dot{W}_{fan}$	Fan gücü, kW
$\dot{W}_{kompresör}$	Kompresör gücü, kW
$\dot{W}_{diğer}$	Diğer ekipmanların gücü, kW
$\dot{W}_{evaporatör}$	Evaporatörde havadan çekilen nem miktarı, kg su/h
$\dot{W}_{kurutma\ odası}$	Kurutma odasında üründen çekilen nem miktarı, kg su/h
w	Özgül nem, g su/kg kuru hava
$\eta_{elektriksel}$	Güneş panelinin elektriksel verimi, %
η_{termal}	Güneş panelinin termal verimi, %
$\eta_{PV/T}$	Güneş panelinin toplam verimi, %
η_{fan}	Fan verimi, %
ρ	Yoğunluk, kg/m^3

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Emre SARI: Literatür taramasını, güneş enerjili eko tasarım kereste kurutma sisteminin tasarımını ve analizini yaparak makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Yaren GÜVEN: Literatür taramasını, güneş enerjili eko tasarım kereste kurutma sisteminin tasarımını ve analizini yaparak makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Mustafa AKTAŞ: Literatür taramasını, güneş enerjili eko tasarım kereste kurutma sisteminin tasarımını ve analizini yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Ceylan, İ., Doğan, H., "Nem Kontrollü Kondenzasyonlu Kereste Kurutma Fırını", ***II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi***, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya,155-166, (2004).

[2] Güngör, A., "Sebze ve Meyve Kurutmada Kullanılan Kurutucular ve Kurutma Teknolojileri", ***11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi***, 17-20 Nisan, İzmir, (2013).

[3] Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., "Havalı Güneş Kolektörlü Ön Kurutucuda Kereste Kurutulması", ***Politeknik Dergisi***, 9: 197-202, (2006).

[4] Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., "Energy and Exergy Analysis of Timber Dryer Assisted Heat Pump", ***Applied Thermal Engineering***, 27: 216-222, (2007).

[5] Aktaş, M., Ceylan, İ., Ergün, A., Gürel, A. E., Atar, M., "Assessment of a Solar-Assisted Infrared Timber Drying System", ***Environmental Progress & Sustainable Energy***, 6: 1875-1881, (2017).

[6] Li, D., Zhang, Z.,Wang, B., Yang, C., Deng, L., "Detection Method of Timber Defects Based on Target Detection Algorithm, ***Measurement***, 203: 111937, (2022).

[7] Lamrani, B., Draoui, A., "Modelling and Simulation of a Hybrid Solar-Electrical Dryer of Wood Integrated with Latent Heat Thermal Energy Storage System", ***Thermal Science and Engineering Progress***, 18: 100545, (2020).

[8] Korkmaz, H., Ünsal, Ö., Görgün, H. V., Avcı, E., "Energy Efficiency in Lumber Drying-Sample of Drying Redpine (Pinusbrutia) Using Solar Energy", ***Journal of Polytechnic***, 23: 671-676, (2020).

[9] Lamrani, B., Kuznik, F., Ajbar, A., Boumaza, M., "Energy Analysis and Economic Feasibility of Wood

ERKEN GÖRÜNÜM

Dryers Integrated with Heat Recovery Unit and Solar Air Heaters in Cold and Hot Climates", ***Energy***, 228: 120598, (2021).

[10] Nadhari, W. N. A. W., Hashim, R., Danish, M., Sulaiman, O., Hızıroğlu, S., "A Model of Drying Kinetics of Acaciamangium Wood at Different Temperatures", ***Drying Technology***, 32: 361-370, (2014).

[11] Lamrani, B., Draoui, A., Kuznik, F., "Thermal Performance and Environmental Assessment of a Hybrid Solar-Electrical Wood Dryer Integrated with Photovoltaic/Thermal Air Collector and Heat Recovery System", ***Solar Energy***, 221: 60-74, (2021).

[12] Zhan, J.,Gu, J., Caı, Y., Analysis of Moisture Diffusivity of Larch Timber During Convective Drying Condition by Using Crank's Method and Dincer's Method", ***Journal of Forestry Research***, 18: 199-203, (2007).

[13] Ünsal, Ö., Dündar, T., As, N., Korkut, S., Görgün, H. V., Kaymakcı, A., "Sarıçam Kerestesinin Kurutulmasında Akustik Emisyon Yönteminin Kullanılması", ***İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi***, 5: 28-40, (2015).

[14] Ceylan, İ., Ergün, A., "Psychrometric Analysis of a Timber Dryer", ***Case Studies in Thermal Engineering***, 2: 29-35, (2014).

[15] Khouya, A., "Energy Analysis of a Combined Solar Wood Drying System", ***Solar Energy***, 231: 270-282, (2022).

[16] Hızıroğlu, S., "Fundamental Aspects of Kiln Drying Lumber", ***Food Technology Fact Sheet***, 146, (2017).

[17] Bell, M., Carrington, G., Lawson, R., Stephenson J., "Socio-Technical Barriers to the Use of Energy-Efficient Timber Drying Technology in New Zealand", ***Energy Policy***, 67: 747-755, (2014).

[18] Zadin, V., Kasemagi, H., Valdna, V., Vigonski, S., Veske, M., Aabloo, A., "Application of Multi Physics and Multi Scale Simulations to Optimize Industrial Wood Drying Kilns", ***Applied Mathematics and Computation***, 267: 465-475, (2015).

[19] Fuwape, I. A., Fuwape, J. A., "Construction and Evaluation of a Timber-Drying Solar Kiln", ***Bioresource Technology***, 52: 283-285, (1995).

[20] Lamrani, B., Khouya, A., Draoui, A., "Energy and Evironmental Analysis of an Indirect Hybrid Solar Dryer of Wood Using TRNSYS Software", ***Solar Energy***, 183: 132-145, (2020).

[21] Salin, J. G., "Problems and Solutions in Wood Drying Modelling: History and Future", ***Wood Material Science and Engineering***, 5: 123-134, (2010).

[22] Özalp, M., Ordu, M., "Kereste Kurutmada Kullanılan Enerji Kaynağının Maliyete Etkileri", ***Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi***, 22: 99-108, (2010).

[23] Bakır, F., "Odunun Kurutulmasının Deneysel ve Matematiksel İncelenmesi", ***Yüksek Lisans Tezi***, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).

[24] Korkmaz, H., "Güneş Enerjili Kereste Kurutma Sistemleri Üzerine İncelemeler", ***Yüksek Lisans Tezi***, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018).

[25] Belessitois, V., Delyannis, E., "Solar Drying", ***Solar Energy***, 85: 1665-1691, (2011).

[26] Sharma, A., Chen, C.R., Lan, N. V., "Solar Energy Drying Systems: A Review", ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 13: 1185-1210, (2009).

[27] Ekechukwu O. V., Norton B., "Review of Solar Energy Drying Systems II: An Overview of Solar Drying Technology", ***Energy Conversion and Management***, 40: 615-655, (1999).

[28] Tarhan S., Ergüneş G., Tekelioğlu O., "Tarımsal Ürünler İçin Güneş Enerjili Kurutucuların Tasarım ve İşletme Esasları", ***Tesisat Mühendisliği Dergisi***, 99: 26-32, (2007).

[29] Malakar, S., Alam, M., Arora, V.K., "Evacuated Tube Solar and Sun Drying of Betroot Slices: Comparative Assessment of Thermal Performance, Drying Kinetics and Quality Analysis", ***Solar Energy***, 233: 246-258, (2022).

[30] Çengel, Y. A., Boles, M. A., "Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik" (Beşinci Baskı). Türkiye: Güven Yayınevi, 168, (2008).

[31] Öz, E. S., Boran, K., Menlik, T., "Tesisat Hesaplama Kuralları" (Birinci Baskı). Türkiye: Birsen Yayınevi, 142, (1998).

[32] Şevik, S., Doğan, H., Aktaş, M., "Güneş Enerjisi ve Isı Pompası Destekli Isıtma-Kurutma Sisteminin Modellenmesi", ***Politeknik Dergisi***, 14: 85-91, (2011).

[33] Engin, D., "Yapı ile Bütünleştirilebilir Güneş Pili/Termal Toplayıcı (Pv/T) Hibrid Sistemin Performans Analizi ve Optimizasyonu", ***Doktora Tezi***, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).

[34] Engin D., Çolak M., "Yarı-Saydam Güneş Pili/Termal Toplayıcı (PV/T) Hibrid Sistemin İzmir Koşullarında Analizi", ***Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi***, 2, (2008).

[35] Aktaş M., Gönen E., "Isı Pompalı Nem Kontrollü Bir Kurutucuda Defne Yaprağı Kurutulması", ***Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi***, 29: 433-441, (2014).

[36] Aktaş, M., Levent, T., Şevik, S., Gülcü, M., Seçkin, G. U., Dolgun, E. C., "Heat Pump Drying of Grape Pomace: Performance and Product Quality Analysis", ***Drying Technology***, 37:1766-1779, (2018).

[37] Urbonas, A., Raudonis, V., Maskeliunas, R., Damasevicius, R., "Automated Identification of Wood Veneer Surface Defects Using Faster Region-Based Convolutional Neural Network with Data Augmentation and Transfer Learning", ***Applied Science***, 9: 4898, (2019).

[38] Ding, F., Zhuang, Z., Liu, Y., Jiang, D., Yan, X., Wang, Z., "Detecting Defects on Solid Wood Panels Based on an Improved SSD Algorithm", ***Sensors***, 20: 5315, (2020).

[39] Wang, L., Li, L., Qi, W., Yang, H., "Pattern Recognition and Size Determination of Internal Wood Defects Based on Wavelet Neural Networks", ***Computers and Electronics in Agriculture***, 69: 142-148, (2009).

[40] Peng, Z., Yue, L., Xiao, N., "Simultaneous Wood Defect and Species Detection with 3d Laser Scanning Scheme", ***International Journal of Optics***, 7049523, (2016).

[41] YongHua, X., Jin-Cong, W., "Study on the Identification of the wood Surface Defects Based on Texture Features", ***Optik***, 126: 2231-2235, (2015).

ERKEN GÖRÜNÜM

[42] Aytekin, A., "Kereste Kurutma Fırınları İçin Kurutma Programlarının Bilgisayarla Hazırlanması", ***Yüksek Lisans Tezi***, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1997).

[43] Dikmen, E., Şahin, A. S., Yakut, A. K., "Deneysel Bir Kurutma Sistemi Tasarımı ve Çalışma Parametrelerinin İncelenmesi", ***Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi***, 2: 81-88, (2011).

[44] Chanpet, M., Rakmak, N., Matan, N., Siripatana, C., "Effect of Air Velocity, Temperature, and Relative Humidity on Drying Kinetics of Rubber Wood", ***Heliyon***, 6: 05151, (2020).

[45] Meng, Y., Chen, G., Hong, G., Wang, M., Gao, J.,Chen, Y., "Energy Efficiency Performance Enhancement of Industrial Converntional Wood Drying Kiln by Adding Forced Ventilation and Waste Heat Recovery System: A Comparative Study", ***Maderas: Cienca Y Tecnologia***, 21: 545-558, (2019).

[46] Milić, G., Kolin, B., Todorović, N., Gorišek, Ž., "Energy Consumption of Beech Timber Drying in Oscillation Climates", ***Drvna Industrija***, 65: 309-314, (2014).

[47] Lawrence, A., Thollander, P., Andrei, M., Karlsson, M., "Specific Energy Consumption/Use (SEC) in Energy Management for Improving Energy Efficiency in Industry: Meaning, Usage and Differences", ***Energies***, 12: 247, (2019).

[48] Khurshid, M. F., Asad, M., Khan, A. A., Chaudhry, M. A., Ammanullah, "Investigation of Specific Energy Consumption and Possible Reduction Measures of Textile Spinning Mills", ***Journal of American Science***, 8: 535-542, (2012).

[49] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., Amirnejat, H., "Comparison of Energy Consumption and Specific Energy Requirements of Different Methods for Drying Mushroom Slices", ***Energy***, 36: 6433-6441, (2011).

[50] İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri". URL: https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri#:~:text=Son%20olarak%2C%20elektrik%20t%C3%BCketim%20noktas%C4%B1,%2De%C5%9Fd.%20sera%20gaz%C4%B1%20emisyonu.

ERKEN GÖRÜNÜM