



ISI POMPALI VE PARABOLİK OLUKLU GÜNEŞ KOLEKTÖRLÜ AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCULARIN DENEYSEL ANALİZİ

Ali Etem GÜREL*, İlhan CEYLAN** ve Sezayi YILMAZ**

*Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 81010, DÜZCE,
etemgurel@gmail.com

**Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 78100, KARABÜK,
ilhancey@gmail.com

***Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 78100, KARABÜK,
syilmaz@karabuk.edu.tr

(Geliş Tarihi: 14.04.2014, Kabul Tarihi: 09.07.2014)

Özet: Bu çalışmada, ısı pompalı ve parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucular tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarlanan kurutucular, Termodinamiğin birinci ve ikinci kanuna göre analiz edilmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, 40 °C set sıcaklığındaki kurutma havası ısı pompalı kurutucuda ± 0.254 °C ve parabolik oluklu kurutucuda ± 0.369 °C hassasiyette PID olarak kontrol edilmiştir. Isı pompalı sistem için tüm sistem ısıtma tesir katsayısı (COP_{ts}) ortalama 1.91 olarak hesaplanmıştır. Parabolik oluklu kurutucu için ısıtma performans katsayısı (IPK) ortalama 3 olarak hesaplanmıştır. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu için ortalama ekserji kaybı 203.97 J/kg olarak hesaplanırken parabolik oluklu kurutucu için bu değer 32.08 J/kg olarak hesaplanmıştır. Ortalama ekserji verimleri ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu için % 31.1 olurken, parabolik oluklu kurutucuda bu değer % 63.37 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Isı pompası, parabolik oluk, kurutma, enerji, ekserji.

EXPERIMENTAL ANALYSES OF HEAT PUMP AND PARABOLIC TROUGH SOLAR FLUIDIZED BED DRYER

Abstract: In this study, both a heat pump and parabolic trough solar fluidized bed dryer were designed and manufactured. They were experimentally analyzed by first and second laws of thermodynamics and a comparison was made between the two. Drying air temperatures were controlled as PID for 40 °C set temperatures. Drying air temperature was controlled with a sensitivity of ± 0.254 °C in heat pump dryer system and ± 0.369 °C in parabolic trough solar dryer. In the heat pump dryer system, whole system heating coefficient of performance (COP_{ts}) was calculated as average 1.91. In parabolic trough solar dryer, heating performance coefficient (IPK) was calculated as average 3. Exergy loss was found to be 203.97 J/kg in the heat pump dryer, and 32.08 J/kg in parabolic trough solar dryer. Average exergy efficiency was found to be 31.1% in the heat pump dryer, and 63.37% in parabolic trough solar dryer.

Keywords: Heat pump, parabolic trough, drying, energy, exergy.

SEMBOLLER

A	kolektör yüzey alanı [m^2]	<i>Alt indisler</i>	
C_p	özgül ısı [kJ/kgK]	ayk	akışkan yataklı kurutucu girişi
COP_{ts}	tüm sistem için performans katsayısı	$ayç$	akışkan yataklı kurutucu çıkışı
e	ekserji [kJ/kg]	$çev$	çevre
I_t	toplam güneş radyasyonu [Wh/m^2]	$evap$	evaporatör
IPK	ısıtma performans katsayısı	f	fan
\dot{m}	kütleli debi [kg/s]	h	hava
\dot{Q}	atılan ısı miktarı [kJ]	id	ısı değiştirici
T	sıcaklık [K]	$komp$	kompresör
V	hava hızı [m/s]	kon	kondenser
\dot{W}	harcanan güç [kW]	p	pompa
		sg	sistem giriş havası

GİRİŞ

Kurutma; bir madde içinde bulunan sıvının kontrollü veya kontrolsüz yöntemler kullanılarak uzaklaştırılmasıdır. Teknik kurutmada, kuruma işlemine dış müdahale yapılarak madde içinde bulunan nem değişik metotlarla alınır. Bu nedenle kurutma, kuruyacak ürün neminin istenilen kuruluk değerlerine düşürülmesini sağlayan bir süreç olarak tanımlanır. Belli bir süreçte ürünün kuruma değerlerine gelmesini sağlayan ve değişik birimlerden oluşan (ısıtma, nem alma, buharlama vb.) ünitelerin bütününe de kurutma sistemi denir (Ceylan ve Doğan, 2004).

Kurutulacak ürünlerin özelliklerine ve yapılarına bağlı olarak kullanılan birçok kurutma yöntemi ve kurutma sistemi geliştirilmiştir. Bu kurutuculardan biride akışkan yataklı kurutuculardır. Akışkan yataklı sistemlerin temel prensibi, kurutulacak tanecikli ürünlere akışkan özelliklerine benzer özellikler kazandırılmasıdır. Bu sistemlerde kurutulacak ürünler akışkan bir ortam (hava) içinde askı halinde tutulurken kuruma işlemi gerçekleşir (Mujumdar, 2006).

Geleneksel akışkan yatak, katı parçacıklardan oluşmuş bir yatağın altından bir gaz (genellikle hava) akımının geçirilmesi ile elde edilir. Düşük gaz hızlarında yatak statiktir. Partikül yatağı bir dağıtıcı plaka üzerindedir. Akışkanlaştırıcı gaz dağıtıcı plakadan geçer ve akışkan yatak boyunca homojen bir biçimde dağılır. Akışkanlaştırıcı gaz hızı arttıkça bu durum yatak boyunca basınç düşümünün artmasına neden olur. Belirli bir gaz hızında akışkan yatak içerisindeki gaz akımı tüm yatağın ağırlığını destekleyecek düzeye ulaştığında yatak akışkanlaşır (Mujumdar, 2006).

Akışkan yataklı kurutucuların tasarım ve modellenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Nazghelichi *vd.* (2010) yaptıkları çalışmada, havuç küplerinin kurutulmasında akışkan yatağın enerji ve ekserji analizlerini araştırmışlardır. Meziane (2011) yaptığı çalışmada prininin akışkan yatakta kurutulma parametrelerini incelemiştir. Kurutma deneyleri farklı hava sıcaklıklarında, hava hızlarında ve yatak yüksekliklerinde gerçekleştirilmiştir. Adamiec (2002) yaptığı çalışmada, atık çamurların karıştırıcılı akışkan yataklı bir kurutucuda kurutulmasını incelemiştir. Çalışmada iki farklı atık tipinin kurutulması araştırılmıştır. Erçetin (2007) doktora çalışmasında, buğdayın kurutulması işleminin, geleneksel yöntemler yerine akışkan yataklı kurutucuda gerçekleştirilmesi incelemiştir. Bu amaçla kurulan bir akışkan yataklı kurutucuda, buğdayın kuruma karakteristiğine çeşitli parametrelerin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Niamnuy ve Devahastin (2005) yaptıkları çalışmada, endüstriyel ölçekli yığın tipi akışkan yataklı bir kurutucuda kıyılmış Hindistan cevizinin kurutma kinetiklerini ve kalitesini araştırmışlardır. Momenzadeh

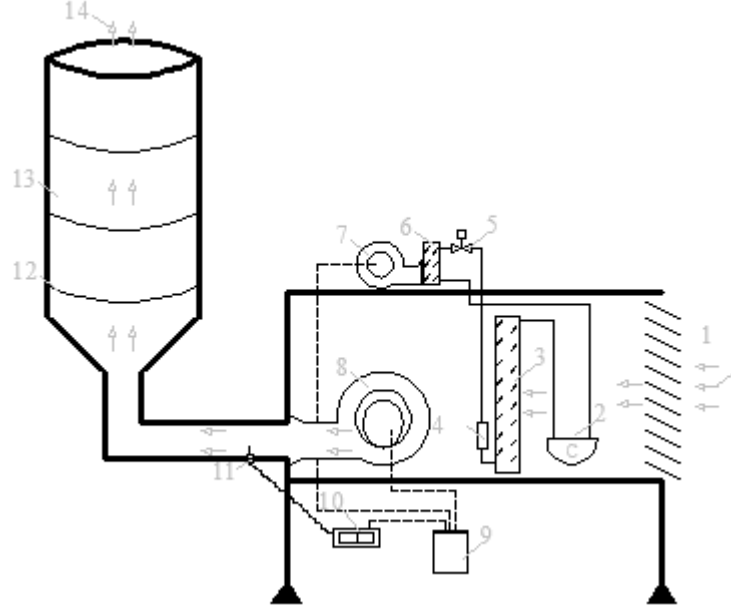
vd. (2011) mikrodalga destekli akışkan yataklı bir kurutucuda tane mısır kurutulmasını yapay sinir ağları kullanarak teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Stanislawski (2005) yaptığı çalışmada, doğranmış havucun kurutulmasını laboratuvar tipi mikrodalga akışkan yataklı kurutucusunda ve standart akışkan yataklı kurutucuda incelemiştir.

Bu çalışmaların yanı sıra, parabolik oluklu güneş kolektörlerinin tasarım ve kullanımına yönelik çalışmalar da mevcuttur. Ceylan ve Ergün (2013) yaptıkları çalışmada, sıcaklık kontrollü parabolik oluklu güneş kolektörü sistemini test etmişlerdir. Deneyler 40-100 °C sıcaklıklarında yapılmıştır. Çalışmada en yüksek enerji verimi % 61.2 olarak 100 °C sıcaklığında, en yüksek ekserji verimi ise % 63 olarak 70 °C sıcaklıkta bulunmuştur. Reddy ve Kumar (2012) çalışmalarında güç üretimi amacıyla tasarlanan parabolik oluklu güneş kolektörü sisteminin deneysel analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, yağ ve su gibi farklı çalışma akışkanları kullanılmıştır. Kumerasan *vd.* (2012) depolama ünitesi entegre edilmiş parabolik oluklu güneş kolektörü sisteminin incelenmesi üzerine çalışmışlardır.

Bu çalışmada PID kontrollü parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı akışkan yataklı kurutucuların deneysel analizi gerçekleştirilmiştir. Her bir kurutucu yapısı için Termodinamiğin birinci ve ikinci kanun analizleri ile matematiksel olarak sistem performansları değerlendirilmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

DENEYSEL SİSTEMLER VE ÇALIŞMA PROSEDÜRLERİ

Çalışmada parabolik oluklu güneş kolektörlü ve ısı pompalı akışkan yataklı kurutucuların deneysel analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki kurutucuda da kurutma havası sıcaklıkları ve kurutma havası hızları PID kontrollü olarak sağlanmıştır. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucunun şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Sistemde giriş damperinden alınan hava, kompresör ve kondenser üzerinden geçirilmekte ve buradan atılan ısı fan yardımıyla akışkan yatağa taşınmaktadır. Fan çıkışında bulunan sıcaklık sensörü bu noktadan aldığı sıcaklık değerlerini proses kontrol cihazına, proses kontrol cihazı da bu verileri invertöre aktarmaktadır. Invertör set edilen sıcaklık değerine göre fan hızlarını kontrol eder. Kurutma havası set edilen sıcaklık değerinin altına düştüğünde, invertör kurutucu girişinde bulunan kondensere ait ve dışarıda evaporatöre ait fanların hızlarını azaltarak sıcaklığı set değerine ulaştırır. Bu durumun tersi de mümkündür. Bu sistemde kurutucudan çıkan hava tekrar kullanılmamıştır. Tekrar kullanılması durumunda kurutma havası nemi artacak ve havanın nem alma kapasitesi de düşecektir ve bu durum kurutma süresini de uzatacaktır.

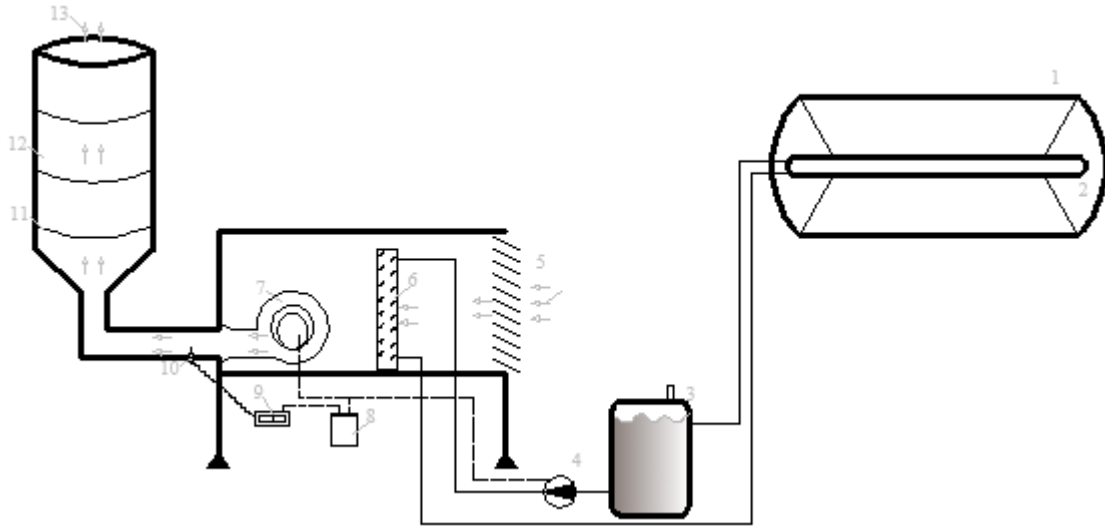


Şekil 1. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu. 1. Taze hava girişi, 2. Kompresör, 3. Kondenser, 4. Filtre, 5. Genleşme valfi, 6. Evaporatör, 7-8. Fan, 9. İntertör, 10. Proses kontrol cihazı, 11. Sıcaklık sensörü, 12. Kurutma rafı, 13. Akışkan yatak, 14. Çıkış havası.

Bu durumda sistemde kullanılan havanın evaporatör üzerinden geçirilerek sistemde tekrar kullanılması mümkündür literatürde bu şekilde yapılan onlarca çalışma mevcuttur (Mancini *vd*, 2011; Wang *vd*, 2011; Rezk ve Forsberg, 2011). Fakat bu durumda da kurutma havası sıcaklığının istenilen set sıcaklığında tutulması oldukça zorlaşacaktır. Keza evaporatör ve kondenser aynı ortamda olduğundan termodinamik denge için bu durumda dışarıya bir yardımcı kondenser konulması gerekecektir. Yine bu şekilde yapılmış çalışmalar literatürde görülecektir (Hossain *vd*, 2013; Teeboonma

vd, 2003). Bu çalışmayı literatürdekilerden farklı kılan en önemli etken dışarıda evaporatöre ait fanın hızının kuruma havası sıcaklığına göre kontrol edilmesi olmuştur. Bu sayede diğer sistemlere oranla önemli miktarda elektrik enerjisi tasarrufu sağlanmıştır.

Diğer bir deneysel çalışma olan, ısı kaynağının güneş enerjisinden sağlandığı parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucunun şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



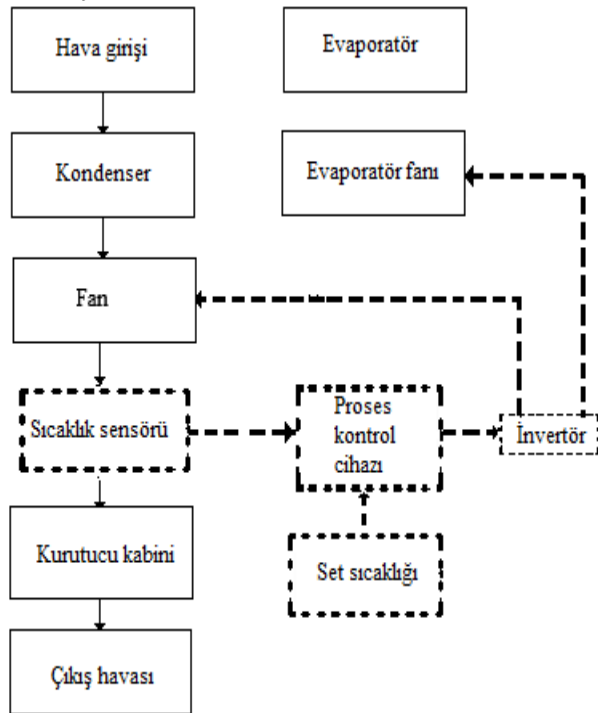
Şekil 2. Parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucu. 1. Parabolik oluk, 2. Vakum tüp, 3. Sıcak su deposu, 4. Pompa, 5. Taze hava girişi, 6. Isı değiştirici, 7. Fan, 8. İntertör, 9. Proses kontrol cihazı, 10. Sıcaklık sensörü, 11. Kurutma rafı, 12. Akışkan yatak, 13. Çıkış havası.

Sistemde parabolik oluklu güneş kolektöründe kullanılan vakum tüp içerisinde dolaşan su, sıcak su deposuna aktarılmakta ve pompa aracılığı ile ısı değiştiricisinden geçirilmektedir. Isı değiştiricisinde atılan ısı, fan ile akışkan yatağa iletilmektedir. Fan çıkışında bulunan sıcaklık sensörü bu noktadan aldığı sıcaklık değerlerini proses kontrol cihazına, proses kontrol cihazı da bu verileri invertöre aktarmaktadır.

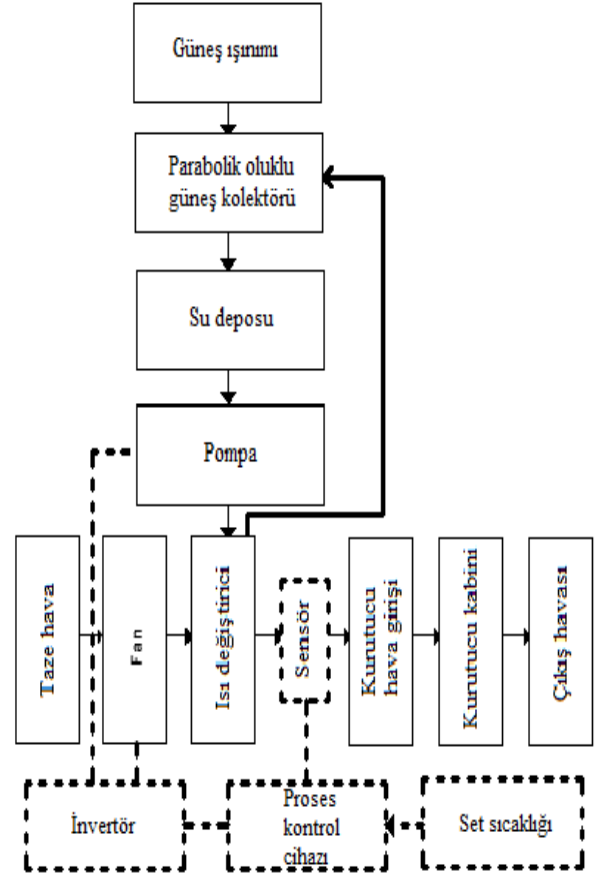
Eğer set değeri kurutma hava sıcaklığından yüksek ise kurutucu girişindeki fan hava hızı düşer. Böylece ısı değiştirici üzerinden geçen hava debisi azalır ve kurutma havası sıcaklığı set değerine ulaştırılır. Benzer şekilde, set değeri kurutma hava sıcaklığından yüksek olduğunda pompa hızı azalır. Bu durumda parabolik oluklu kolektörden geçen su debisi de azalır. Kolektör çıkış sıcaklığı pompa hızının azalmasıyla artar. Böylece kurutma havası sıcaklığı set değeri sıcaklığına doğru yükselmeye başlar.

Eğer set değeri kurutma hava sıcaklığından düşük ise, kurutucu girişindeki fan hızı artar. Böylece ısı değiştirici üzerinden geçen taze hava debisi artar ve kurutma havası sıcaklığı set değerine doğru düşmeye başlar. Benzer şekilde, set değeri kurutma hava sıcaklığından düşük olduğunda pompa hızı artar. Bu durumda parabolik oluklu kolektörden geçen su sıcaklığı düşer. Başka bir ifadeyle, kurutma havası sıcaklıkları hava ve su hızlarının invertör tarafından ayarlanması ile set değerine ulaştırılır.

Şekil 3 ve 4'te sırasıyla ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu ve güneş enerjili akışkan yataklı kurutucular için kontrol sistemi mantıksal akış diyagramları verilmiştir.



Şekil 3. Isı pompalı kurutucu için kontrol sistemi akış diyagramı



Şekil 4. Güneş enerjili kurutucu için kontrol sistemi akış diyagramı

ENERJİ ANALİZİ

Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu için kondenserden atılan ısı miktarı aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunur.

$$\dot{Q}_{kon} = \dot{m}_{sgh} \cdot C_{p,h} \cdot (T_{aykg} - T_{sgh}) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{sgh} = \rho_{sgh} \cdot \dot{V}_{sgh} \quad (2)$$

Isı pompası sisteminin performans katsayısı (COP) Eş. (3) kullanılarak hesaplanabilir.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{kon}}{\dot{W}_{komp}} \quad (3)$$

Sistemde kullanılan tüm ekipmanların enerji tüketimlerine bağlı olarak tüm sistem performans katsayısı (COP_{ts}) aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanabilir.

$$COP_{ts} = \frac{\dot{Q}_{kon}}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_f + \dot{W}_{evap,f}} \quad (4)$$

Parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucunun ısı değiştiricisinden atılan ısı miktarı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\dot{Q}_{id} = \dot{m}_{sgh} \cdot C_{p,h} \cdot (T_{aykg} - T_{sgh}) \quad (5)$$

Sistemin enerji verimi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{id}}{A \cdot I_t + \dot{W}_f + \dot{W}_p} \quad (6)$$

Sistemin ısı değiştiricisinden elde edilen enerji miktarının, sistem bileşenleri tarafından harcanan enerjiye oranı ısıtma performans katsayısı (IPK) olarak tanımlanmış ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır (Gürel ve Ceylan, 2014).

$$IPK = \frac{\dot{Q}_{id}}{\dot{W}_f + \dot{W}_p} \quad (7)$$

EKSERJİ ANALİZİ

Ekserji tersinir bir süreç sonucunda çevre ile denge sağlandığı takdirde, teorik olarak elde edilen maksimum iş miktarıdır. Yani ekserji en basit anlamda, enerjinin kullanılabilen kısmıdır ve kullanılabilirlik olarak da ifade edilir.

Ekserji, iş veya iş üretebilme yeteneğidir. Bu tanımlara uygun olarak ekserjinin hesaplanabilmesi için çevre şartlarının bilinmesi gerekir. Tersinir süreçler yoluyla, bir madde doğal çevrenin temel elemanları ile termodinamik denge durumuna getirildiğinde elde edilebilecek iş miktarı o maddenin ekserjisine eşittir (Şahin vd, 2007; Bejan, 1998).

Bu çalışmada, Termodinamiğin ikinci kanunu kapsamında, her iki sistem için akışkan yataklı kurutucuya olan ekserji girişi ve çıkışları hesaplanmıştır.

Her iki sistem için de akışkan yataklı kurutucuya ekserji girişi Eş. (8) kullanılarak hesaplanır (Ceylan vd, 2007; Gürel ve Ceylan, 2014).

$$e_{aykg} = C_{p,h} \cdot \left[(T_{aykg} - T_{\zeta ev}) - T_{\zeta ev} \ln \left(\frac{T_{aykg}}{T_{\zeta ev}} \right) \right] \quad (8)$$

Benzer şekilde ekserji çıkışı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir (Ceylan vd, 2007; Gürel ve Ceylan, 2014).

$$e_{ayk\zeta} = C_{p,h} \cdot \left[(T_{ayk\zeta} - T_{\zeta ev}) - T_{\zeta ev} \ln \left(\frac{T_{ayk\zeta}}{T_{\zeta ev}} \right) \right] \quad (9)$$

Akışkan yataklı kurutucuda toplam ekserji kaybı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$\sum e_{kay} = \sum e_{aykg} - \sum e_{ayk\zeta} \quad (10)$$

Sistemler için ekserji verimi Eş. (11) kullanılarak hesaplanır.

$$\eta_e = \frac{e_{ayk\zeta}}{e_{aykg}} \quad (11)$$

BELİRSİZLİK ANALİZİ

Belirsizlik analizi verilen bilgilerin doğruluk sınırlarını belirler. Kurutucuda kullanılan ölçüm cihazının standart sapmaları göz önünde bulundurularak belirsizlikleri Eşitlik 12-16'dan hesaplanmış ve Tablo 1'de verilmiştir.

$$X_m = \frac{1}{N} \sum X_i \quad (12)$$

$$V = \frac{1}{(N-1)} \sum (X_i^2 - X_m^2) \quad (13)$$

$$S = \sqrt{V} \quad (14)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (15)$$

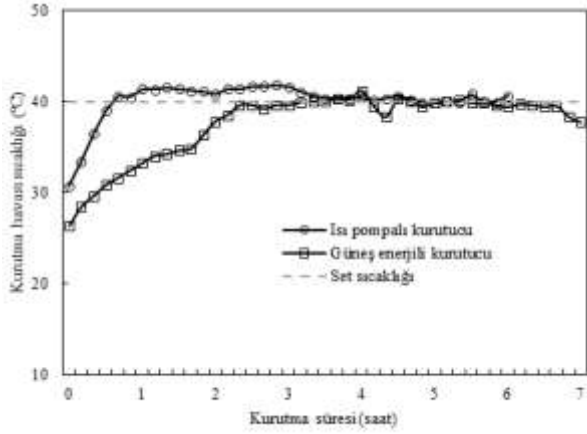
$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^R a_i^2 \cdot S_i^2} \quad (16)$$

Eşitliklerde “ X_m ” gözlemlerin aritmetik ortalaması, “ X_i ” yapılan gözlemler, “ N ” gözlem sayısı, “ a ” hassasiyet, “ S ” standart sapma, “ V ” varyans, “ U ” belirsizliktir (Adapa ve Schoenau, 2005; Aktaş vd, 2010; Ceylan vd, 2013).

DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ

Deneylerde her iki sistemde farklı ürünler kurutulmuştur. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucuda nane yaprakları kurutulurken, parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucuda dut kurutulmuştur. Nane yaprakları 5.67 g su/g kuru madde nem içeriğinden 0.17 g su/g kuru madde nem içeriğine 6 saatte indirilmiştir. Dutlar ise, 4 g su/ g kuru madde nem içeriğinden 2.64 g su/g kuru madde nem içeriğine 7 saatte indirilmiştir.

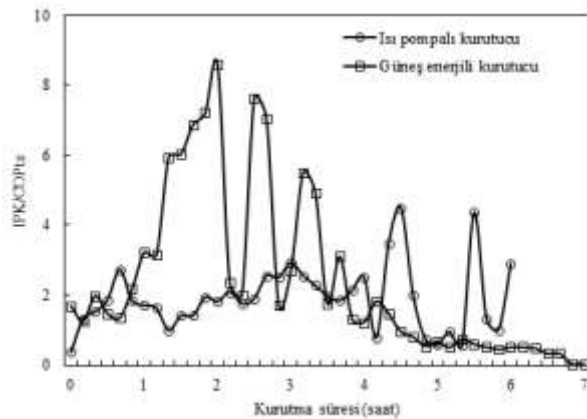
Her iki sistemde 40 °C sıcaklık değerine set edilmiştir. Bu sayede sistem performanslarının karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 5'te kurutma havası sıcaklıkları ve kurutma süresi arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 5. Kurutma süresine göre kurutma havası sıcaklıklarının değişimi

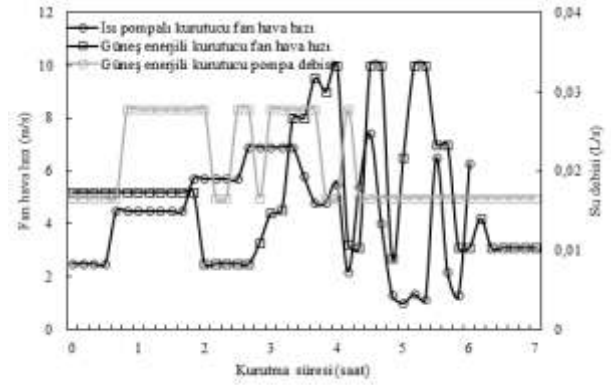
Grafik incelendiğinde sistemlerin geçici rejimlerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Bunun nedeni güneş enerjili akışkan yataklı kurutucuda, kurutma havası sıcaklığının güneş ışınımı ile doğrudan ilişkili olmasıdır. Geçici rejim aşıldıktan sonra her iki sistemde de kurutma havası sıcaklıkları iyi bir hassasiyetle set değerinde tutulmuştur. Bu hassasiyetler, ısı pompalı kurutucu için ± 0.254 °C ve güneş enerjili kurutucu için ± 0.369 °C olmuştur.

Şekil 6'da ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu için tüm sistem performans katsayısı (COP_{ts}) ve güneş enerjili akışkan yataklı kurutucu için ısıtma performans katsayısı (IPK) değerlerinin kurutma süresine göre değişimleri verilmiştir. Deneyler sonucunda ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu için COP_{ts} değeri ortalama 1.91 olarak bulunurken güneş enerjili akışkan yataklı kurutucu için IPK değeri ortalama 3 olarak bulunmuştur. Diyagramdaki dalgalanmaların nedeni sistem bileşenlerinin sıcaklığa göre devreye girip çıkmasıdır.



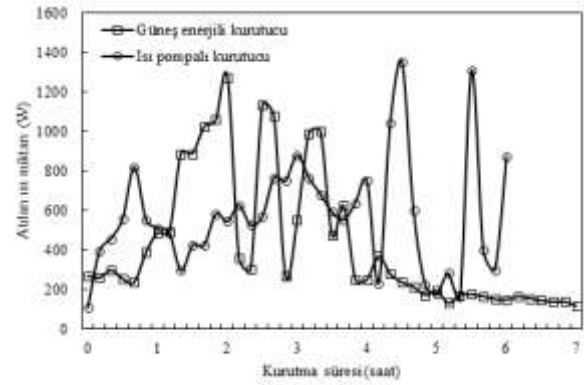
Şekil 6. IPK ve COP_{ts} değerlerinin kurutma süresine göre değişimi

Şekil 7'de her iki sistem için de fan hava hızlarının ve güneş enerjili akışkan yataklı kurutucu için pompa su debisi değerlerinin kurutma süresine göre değişimleri verilmiştir.

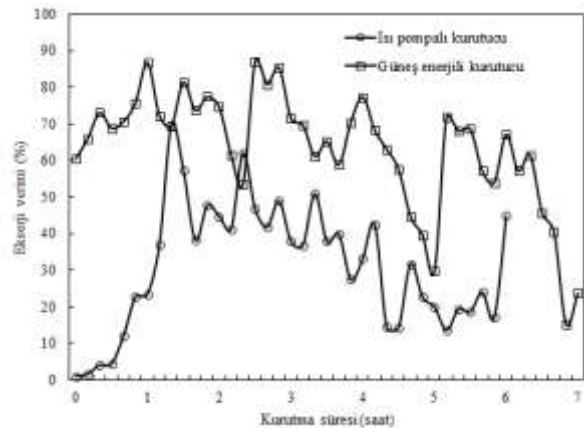


Şekil 7. Fan hava hızlarının ve pompa su debisinin kurutma süresine göre değişimi

Sistemlerde fan hızı, kurutma havası sıcaklığına göre kontrol edilmektedir. Bu nedenle fan hızındaki artış, kurutma havası sıcaklığının azalması anlamına gelmektedir. Fan hızının artışıyla birlikte Eşitlik 1 ve 5 kullanılarak hesaplanan ısı değiştiricilerinden atılan ısı miktarları da artmaktadır. Bu durum Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Atılan ısı miktarlarının kurutma süresine göre değişimi



Şekil 9. Ekserji verimlerinin kurutma süresine göre değişimi

Şekil 9'da ısı pompalı ve güneş enerjili akışkan yataklı kurutucular için ekserji verimlerinin kurutma süresine göre değişimleri verilmiştir. Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu için ortalama ekserji kaybı 203.97 J/kg olarak hesaplanırken güneş enerjili akışkan yataklı kurutucu

için bu değer 32.08 J/kg olarak hesaplanmıştır. Ortalama ekserji verimleri ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu için % 31.1 olurken, güneş enerjili akışkan yataklı kurutucuda bu değer % 63.37 olarak hesaplanmıştır.

Deneyel sistemlerde kullanılan ölçüm ve kontrol cihazlarının teknik özellikleri ve belirsizlikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan ölçüm ve kontrol cihazlarının teknik özellikleri ve belirsizlikler

Kullanılan cihaz	Teknik özellikleri	Belirsizlik (Güneş enerjili kurutucu)	Belirsizlik (Isı pompalı kurutucu)
Termohigrometre	TESTO, NTC sensör. Sıcaklık ölçüm aralığı: -10 ~ + 60 °C. Hassasiyet: ± 0.5 °C. Bağıl nem ölçüm aralığı: % 0~100 RH. Hassasiyet: ± 2.5 % RH (% 0~95 RH).	± 0.44°C, ± 0.874 RH (%)	± 0.36°C, ± 0.706 RH (%)
İnvertör	ABB, 200-240 VAC, 0.75 kW, bir fazlı invertör.	-	-
Anemometre	DELTA OHM, Ölçüm aralığı: 0.6 m/s ~ 20 m/s. Hassasiyet: ± 0.2 m/s.	± 0.322 m/s	± 0.324 m/s
Proses kontrol cihazı	ORDEL, PC440, 4 W, 100–240 VAC. Transmitter Besleme: 24 VDC.	-	-
Dijital solar metre	PCE, Ölçüm aralığı: 0 ~ 2000W/m ² . Hassasiyet: ± %5 W/m ² .	± 35.78 W/m ²	-
Dijital terazi	METLER TOLEDO, 6100 g kapasite. Hassasiyet: ± 0.01 g.	± 0.212 g	± 1.498 g

SONUÇLAR

Bu çalışmada PID sıcaklık kontrollü ısı pompalı ve parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucular tasarlanmış ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Isı pompalı akışkan yataklı kurutucuda sirkülasyon havası kullanımı yerine evaporatör fan hızı kontrol edilmiştir. Bu sayede çok daha değerli olan elektrik enerjisinden tasarruf edilmiştir.
- Isı pompalı akışkan yataklı kurutucunun tüm sistem performans katsayısı ortalama olarak 1.91 olarak hesaplanmıştır.
- Isı pompalı kurutucuda kurutma havası ± 0.254 °C hassasiyetle kontrol edilmiştir.
- Isı pompalı kurutucuda maksimum ekserji verimi %70 olarak hesaplanmıştır.
- Isı pompalı akışkan yataklı kurutucu için ekserji verimi ortalama % 31.1 olarak hesaplanmıştır.
- Güneş enerjili akışkan yataklı kurutucunun ısıtma performans katsayısı ortalama olarak 3 olarak bulunmuştur.
- Güneş enerjili akışkan yataklı kurutucuda kurutma havası ± 0.369 °C hassasiyetle kontrol edilmiştir.
- Güneş enerjili akışkan yataklı kurutucu için ortalama ekserji verimi % 63.37 olarak hesaplanmıştır.
- Güneş enerjili akışkan yataklı kurutucuda sıcaklık için geçici rejimin uzun olduğu görülmektedir. Bu süre su deposundaki su miktarının azaltılmasıyla kısaltılabilir.
- Her iki sistemde de kurutma havası sıcaklıkları iyi bir hassasiyetle kontrol edilebilmiştir. Bu nedenle

kurutma sıcaklıklarının önem taşıdığı uygulamalar için her iki sistem de kullanılabilir.

- Enerji giderleri ve performans değerleri göz önüne alındığında parabolik oluklu güneş kolektörlü akışkan yataklı kurutucu çok daha kullanışlıdır.
- Güneş enerjili akışkan yataklı kurutucuda depodaki su miktarı ve kolektör yüzey alanı artırılarak sistemden gece boyunca yararlanılabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmayı destekleyen Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Adapa K.P. and Schoenau J.G., 2005, Re-Circulating Heat Pump Assisted Continuous Bed Drying and Energy Analysis, *International Journal of Energy Research*, 29:961-972.
- Ademiec J., 2002, Drying of Waste Sludges in a Fluidized Bed Dryer With a Mixer, *Drying Technology: An International Journal*, 20(4&5):839-853.
- Aktaş, M., Ceylan, İ., Doğan, H. ve Aktekel, Z., 2010, Güneş Enerjisi Destekli, Isı Pompalı Kırmızıbiber Kurutucusunun Tasarımı, İmalatı ve Performans Deneyleri. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi/Journal of Thermal Science & Technology*, 30(1):111-120.
- Bejan A., 1998, *Advanced Engineering Thermodynamics* (First Ed.), Wiley, New York.
- Ceylan İ., Aktas M. and Doğan H., 20[07, Energy and Exergy Analysis of Timber Dryer Assisted Heat Pump, *Applied Thermal Engineering*, 27:216–222.

Ceylan İ., Ergün A., 2013, Thermodynamic Analysis of a New Design of Temperature Controlled Parabolic Trough Collector, *Energy Conversion and Management*, 74:505-510.

Ceylan İ. ve Doğan H., 2004, Güneş Enerjili ve Nem Kontrollü Kondenzasyonlu Bir Kereste Kurutma Fırınının Modellenmesi, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 150-158.

Ceylan İ., Kaya M., Gürel A.E. ve Ergün A., 2013, Energy Analysis of a New Design of a Photovoltaic Cell-Assisted Solar Dryer, *Drying Technology: An International Journal*, 31(9): 1077-1082.

Erçetin Ü., 2007, Tanecikli Gıda Maddelerinin Akışkan Yatakta Kurutulması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*.

Gürel A.E. and Ceylan İ., 2014, Thermodynamic Analysis of PID Temperature Controlled Heat Pump System, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2:42-49.

Hossain M.A., Gottschalk K. and Hassan M.S., 2013, Mathematical Model for a Heat Pump Dryer for Aromatic Plant, *Procedia Engineering*, 56:510 – 520.

Kumaresan G., Sridhar R. and Velraj R., 2012, Performance Studies of a Solar Parabolic Trough Collector with a Thermal Energy Storage System, *Energy*, 47(1):395-402.

Mancini F., Minetto S. and Fornasieri E., 2011, Thermodynamic Analysis and Experimental Investigation of a CO₂ Household Heat Pump Dryer, *International Journal of Refrigeration*, 34:851-858.

Meziane S., 2011, Drying Kinetics of Olive Pomace in a Fluidized Bed Dryer, *Energy Conversion and Management*, 52:1644-1649.

Momenzadeh L., Zomorodian A. and Mowla D., 2011, Experimental and Theoretical Investigation of Shelled Corn Drying in a Microwave-Assisted Fluidized Bed Dryer Using Artificial Neural Network, *Food and Bioprocess Processing*, 89:15-21.



Ali Etem GÜREL, Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünden 2008 yılında mezun oldu. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümünde Yüksek lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Düzce Üniversitesi Düzce Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümünde başladığı Doktora Eğitimine devam etmektedir.

Mujumdar A.S., 2006, *Handbook of Industrial Drying* (Third Ed.) CRC Press.

Nazghelichi T., Kianmehr M.H. and Aghbashlo M., 2010, Thermodynamic Analysis of Fluidized Bed Drying of Carrot Cubes, *Energy*, 35:4679-4684.

Niamnuy C., and Devahastin C., 2005, Drying Kinetics and Quality of Coconut Dried in a Fluidized Bed Dryer, *Journal of Food Engineering*, 66:267-271.

Redd K.S. and Kumar K.R., 2012, Solar collector field design and viability analysis of stand-alone parabolic trough power plants for Indian conditions, *Energy for Sustainable Development*, 16:456-470.

Rezk K. and Forsberg J., 2011, Geometry Development of the Internal Duct System of a Heat Pump Tumble Dryer Based on Fluid Mechanic Parameters from a CFD Software, *Applied Energy*, 88:1596-1605.

Stanislowski J., 2005, Drying of Diced Carrot in a Combined Microwave-Fluidized Bed Dryer, *Drying Technology: An International Journal*, 23(8):1711-1721.

Şahin H.M., Acır A., Baysal E. ve Koçyiğit E., 2007, Enerji ve Ekserji Analiz Metoduyla Kayseri Şeker Fabrikasında Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 22(1):111-119.

Teeboonma U., Tiansuwan J. and Soponronnarit S., 2003, Optimization of Heat Pump Fruit Dryers, *Journal of Food Engineering*, 59:369-377.

Wang D.C., Zhang G., Han Y.P., Zhang J.P. and Tian X.L., 2011, Feasibility Analysis of Heat Pump Dryer to Dry Hawthorn Cake, *Energy Conversion and Management*, 52:2919-2924.



İlhan CEYLAN, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünden 1999 yılında mezun oldu. 2003 yılında Karaelmas Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde Yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2007 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora Eğitimini tamamladı. 2009-2012 yılları arasında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde Yardımcı Doçent Doktor olarak çalışmış ve 2012 yılından bugüne Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde Doçent Doktor olarak görev yapmaktadır. Kurutma, Güneş Enerjisi Sistemleri, İklimlendirme ve Soğutma konularını içeren yaklaşık 50 adet yurt içi ve yurt dışı yayını bulunmaktadır.



Sezai YILMAZ, 1985 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinden lisans, 1988 yılında aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi ABD'den yüksek lisans ve 1996 yılında aynı yerde Doktora eğitimini tamamladı. 1985-1998 yılları arasında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde araştırma görevlisi ve öğretim görevlisi kadrolarında çalıştı. 1998 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Tesisat ABD'nde Yardımcı Doçent Doktor ünvanıyla göreve başladı. Halen Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi ve Meslek yüksekokulu müdürlüğü görevini yürütmektedir. Alanı ile ilgili SCI'da taranan dergilerde yayınlamış 6 adet, yurtiçinde yayınlanan hakemli dergiler ve düzenlenmiş sempozyumlarda sunulmuş 25'ye yakın makalesi ve bildirisi bulunmaktadır.