

Tarım Bilimleri Dergisi
Tar. Bil. Der.
Dergi web sayfası:
www.agri.ankara.edu.tr/dergi

Journal of Agricultural Sciences
Journal homepage:
www.agri.ankara.edu.tr/journal

TARIM BİLİMLERİ DERGİSİ — JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES 21 (2015) 220-235

Isı Pompalı Kurutucuda Atık Isı Kullanımının Performansa Etkisi ve Deneysel Analizi

Mustafa AKTAŞ[a], Burak AKTEKELİ[b]

[a]*Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar, Beşevler, 06500, Ankara, TÜRKİYE*

[b]*Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Osmaneli M.Y.O, İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Bölümü, Osmaneli, 11500, Bilecik, TÜRKİYE*

ESER BİLGİSİ
Araştırma Makalesi
Sorumlu Yazar: Mustafa AKTAŞ, E-posta: mustafaaktas@gazi.edu.tr, Tel: +90 (312) 202 87 07
Geliş Tarihi: 17 Mart 2014, Düzeltmelerin Gelişi: 04 Haziran 2014, Kabul: 09 Temmuz 2014

ÖZET

Bu çalışmada, ısı pompalı üç farklı modda (sistem 1, sistem 2 ve sistem 3) kurutucu tasarlanmış, imal edilmiş ve bayat ekmek dilimleri farklı şartlarda kurutulmuştur. 15 mm kalınlığında dilimlenen bayat ekmekler, kuru baza göre 0.55 g_{su} $g_{kuru\ madde}^{-1}$ başlangıç nem miktarından 0.09 g_{su} $g_{kuru\ madde}^{-1}$ son nem miktarına kadar ortalama 2.9 saatte kurutulmuştur. Bayat ekmek dilimleri 45 °C - 50 °C üfleme havası sıcaklığında ve değişken hava hızlarında (0.2 m s^{-1} – 0.7 m s^{-1}) kurutulmuştur. İstenilen kurutma havası sıcaklığı oransal-integral-türevsel (PID) kontrol kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca kurutulan ürünün yüzey sıcaklığı ısı pompasının kompresörünün kontrol edilmesiyle sağlanmıştır. 45-50 °C kurutma havası sıcaklığı (KHS) ve 40-45 °C kurutulan ürün yüzey sıcaklığı (KÜYS) set değerlerinde altı deney yapılmıştır. Üç ayrı modda yapılan altı deneyin sonuçlarına göre tüm sistem performans katsayısı (COP_{ws}) en iyi olan sistem, sistem 2 (45 °C KÜYS - 50 °C KHS) de 5.28 olarak hesaplanmıştır. Yapılan üç sistemin içinde en verimlisi sistem 2'dir. Sistem 2 için, atık hava ısı pompası buharlaştırıcısının ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, ısı pompası sistemlerinde kurutma egzoz havası ısısının kullanılmasının uygun ve etkili yöntem olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kurutma; Isı pompası; Enerji; Bayat ekmek; Kurutucu

Performance Effect and Experimental Analysis of Waste Heat Usage in a Heat Pump Dryer

ARTICLE INFO
Research Article
Corresponding Author: Mustafa AKTAŞ, E-mail: mustafaaktas@gazi.edu.tr, Tel: +90 (312) 202 87 07
Received: 17 March 2014, Received in Revised Form: 04 June 2014, Accepted: 09 July 2014

ABSTRACT

In this study, three different modes (system 1, system 2 and system 3) heat pump dryers have been designed, manufactured and stale bread slices have been dried at the different conditions. Stale breads sliced into 15 mm thickness were dried from initial dry basis moisture content 0.55 g_{water} $g_{dry\ matter}^{-1}$ to final moisture content at 0.09 g_{water} $g_{dry\ matter}^{-1}$ average 2.9

hours. Stale bread slices have been dried at 45 °C – 50 °C drying air temperatures and variable air velocities 0.2 m s^{-1} – 0.7 m s^{-1}. Desired drying air temperature was obtained by using Proportional-Integral-Derivation (PID) controller. Also dried product surface temperature was controlled by controlling of compressor of heat pump. Six experiments were done at 45-50 °C drying air temperature (DAT) and 40-45 °C dried product surface temperature (DPST) set values. The best coefficent of performances of whole system (COP_{ws}) were calculated as system 2 (45 °C DPST - 50 °C DAT) 5.28. The best efficient system is system 2 in all three systems. For system 2, heat of exhaust air was used as heat source of evaporator of heat pump. In this study, it is seen that heat pump systems with usage of heat of exhaust drying air are suitable and efficient applications.

Keywords: Drying; Heat pump; Energy; Stale bread; Dryer

© Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi

1. Giriş

Kurutma, kurutulacak ürün neminin istenilen kuruluk değerlerine belli bir süreçte indirgenmesi olarak tanımlanır. Kurutma işleminde kullanılan sistemler sanayinin bir çok dalında (gıda, kağıt, çimento, kereste ve kimya sanayi gibi endüstri dallarında) yaygın olarak uygulanmaktadır (Ceylan & Doğan 2004).

Ürünlerin güneş enerjisine direkt maruz bırakılarak kurutulmaları ürün kalite parametreleri açısından uygun değildir. Bu yüzden birçok ürünün farklı metotlar kullanılarak kurutulma yolları geliştirilmiştir (Cemeroğlu et al 2003). Ülkemizde bir kişinin beslenmesi için ortalama yıllık 225 kg buğday gerekli olduğu düşünülürse ülkemiz için yıllık 14.5 milyon ton buğdaya ihtiyaç vardır (Süzer 2013). Ülkemizde 2012 yılında yapılan araştırmalara göre günlük 6 milyon yıllık ise 2.1 milyar adet ekmek israf edilmektedir. Bu israfın parasal değeri 1.5 milyar TL'dir. Yıllık israf edilen 1.5 milyar TL değerindeki ekmek ile 500 km duble yol, 80 adet hastane, 150 adet okul yapılabilmektedir. Yapılan bu araştırmalar ekmeğin geri dönüşümünün ülke ekonomisine katkısının çok büyük olduğunu göstermektedir (TMO 2013). Isı pompası tekniği kullanılarak bayat ekmek kurutma ile ilgili çalışmaya rastlanılmamış olup, bu çalışmada ısı pompası ile bayat ekmek kurutulması ve bu sürecin termodinamik analizinin yapılması amaçlanmıştır.

Literatürde kurutma sistemlerinde ısı pompası sisteminin kullanılmasıyla ilgili birçok çalışma yer almaktadır. Hawlader & Jahangeer (2006), güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutma sisteminin ve su ısıtıcısının performansını araştırmışlardır. Çalışmada, kompresör hızı 1800 rpm olduğunda COP değerinin 7.5 olduğunu gözlemlemişlerdir. Yeşil fasulyenin kurutulması esnasında 20 kg kurutma yükünde 1200 rpm kompresör hızında SMER değerinin 0.65 olduğunu saptamışlardır. Oktay (1997) ısı pompası destekli kurutucunun performansına etki eden etkenleri araştırmıştır. By-pass hava oranı, toplam hava debisi ve egzoz debisinin sistemin performansını etkileyen anahtar parametreler olduğunu saptamıştır. Evaporatör etrafındaki by-pass havasının sistemin performansını % 20 oranında iyileştirebileceğini, bu iyileşmenin artan hava debisi ile artacağını ve egzoz havasının % 10 azaltılması ile SMER değerinin % 15 oranında iyileşebileceğini belirtmiştir. Fakat bu iyileşmenin kullanılan soğutucu akışkanın yüksek çalışma sıcaklığı ile sınırlı olduğunu belirtmiştir. Şevik et al (2014), güneş enerjili ve güneş enerjisi destekli ısı pompalı olmak üzere ayrı ayrı 45 °C ve 55 °C kurutma havası sıcaklığı 0.9 m s^{-1} ve 1.2 m s^{-1} hava hızlarında mantar kurutmuşlardır. Deneylerden elde edilen nem içeriği (MC), ayrılabilir nem oranı (MR) ve kurutma hızı (DR) değerleri Levenberg-Marquardt (LM) geri yayılım öğrenme algoritması ve Fermi transfer fonksiyonu kullanılarak yapay sinir ağları (YSA) ile modellemişlerdir. Böylece, farklı kurutma şartları için bu modelleme ile mantarın kuruma davranışlarını başarılı bir şekilde analiz etmişlerdir.

Doğan (2003), su-toprak kaynaklı ısı pompalarını incelemiştir. Isı pompalarının, ülkemizde yaygın olarak kullanılmasının enerji verimliliği açısından

uygun olacağını belirlemiştir. Elektrik ve fuel-oil fiyatları dikkate alındığında, fuel-oil ile yapılan ısıtma sistemine göre % 34 daha az enerji harcandığını belirtmiştir. Yapmış olduğu çalışmada ısı atılan ortam olarak hava yerine, deniz suyunun kullanılması durumunda soğutma grubunda % 16 daha az enerji harcandığını belirtmiştir. Fatouh et al (2006), ısı pompalı kurutucu kullanılarak maydanoz, nane ve ebegümeci kurutmuşlardır. Sistemde soğutucu akışkan olarak R-134a gazı kullanılmıştır. Sistemde maksimum verimliliği ve minimum özgül enerji tüketimini 55 ^{o}C sıcaklık, 2.7 m s^{-1} hava hızı ve 28 kg m^{-2} yüzey yükünde elde etmiştir. Akpınar (2004), kırmızıbiber dilimlerinin ince tabaka kurutma işleminin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Araştırmada, konvektif tip kurutucuda 55 ^{o}C, 60 ^{o}C ve 70 ^{o}C sıcaklık değerlerinde ve 1.5 m s^{-1} hava hızında kurutma işlemini gerçekleştirmiş, enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Aktaş et al (2010), güneş enerjisi destekli ısı pompalı bir kurutucuda kırmızıbiber kurutmuşlardır. Kırmızıbiberleri 50 ^{o}C kuru termometre sıcaklığında ve ortalama 0.4 m s^{-1} hava hızında 210 dakikada kurutmuşlardır. Deneylerinde COP_{ws} 2.24 ve $SMER_{ws}$ 0.209 kg kWh^{-1} olarak hesaplanmıştır. Lee & Kim (2009), ısı pompalı kurutma sisteminde ince dilimlenmiş kırmızı turp'u kurutmuşlardır. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek için sıcak havalı ısıtıcıyla da kurutma yapmışlardır. $SMER_{hp}$ değerini 3.4 kg kWh^{-1} hesaplamışlardır. Sıcak havalı kurutma sistemine göre 1-1.5 kat uzun sürmesine karşın bu sistemin enerji kazancının yaklaşık üç kat daha iyi olduğu görmüşlerdir. Söylemez (2006) kurutma sistemlerinde, sistemdeki kurutma odası çıkış havasındaki atık ısıyı kullanan ısı pompalı kurutucuların termo-ekonomik analizini yapmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre, sistemin termo-ekonomik analizi için sistem elemanlarının ısıl analizi ile birlikte basit bir ekonomik analiz yapmış ve ısı pompası için optimum sıcaklık değerlerini hesaplamıştır. Sistem için optimum yoğuşturucu çıkış hava sıcaklığı 50.13 ^{o}C, buharlaştırıcıdan ayrılan hava sıcaklığı 11.90 ^{o}C ve buharlaştırıcıya giren sistem havası sıcaklığı ise 37.68 ^{o}C olarak bulmuştur. Sistem elemanları için optimum çalışma şartlarında COP_{ws} değeri 2.3596 olarak hesaplanmıştır.

Oktay & Hepbaşlı (2003), mekanik ısı pompalı kurutucunun performans değerlendirmesini yapmışlardır. Yapılan çalışmada, yoğuşturucu ve buharlaştırıcı sıcaklıklarına bağlı olarak COP_{ws} 2.47 ile 3.95 arasında değişmiştir. Isı pompalı kurutucuda SMER'in 0.65 ile 1.75 kg kWh^{-1} arasında değiştiği görülmüştür. Gönen (2012), ısı pompalı PLC kontrollü defne yaprağı kurutma fırınını analiz etmiştir. Yapılan bu çalışmada COP_{ws} 45 ºC sıcaklıkta ve 600 $m^3.h^{-1}$ hava debisinde 3.02 olarak hesaplamıştır.

Yapılan bu deneysel çalışma ile ısı pompalı kurutucunun en iyi çalışma şartlarının belirlenmesi ve kurutma odası dönüş havasının değerlendirilip, enerji verimliliğine etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışmada, bayat ekmeğin kurutularak yeniden değerlendirilmesine yönelik analizler yapılarak, enerji verimli bir sistem ile ekonomik bir şekilde tekrar gıda maddesi olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada ısı pompası sistemi ile bayat ekmek kurutulması ve bu sürecin analizinin yapılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Üründe, kurutma esnasında nem miktarının kontrolü için ürünün kuru ağırlığının belirlenmesi gerekir. Sonra kuru ağırlığa göre ürünün başlangıç nem miktarı belirlenir (Aktaş 2007).

Bayat ekmeklerin kuru esasa göre nem miktarı;

$$SO_{KA} = \frac{YA - KA}{KA} \quad (1)$$

Bayat ekmeklerdeki yaş esasa göre nem miktarı;

$$SO_{YA} = \frac{YA - KA}{YA} \quad (2)$$

eşitliklerinden hesaplanır. Deneyler sonucunda bayat ekmeklerdeki nem oranı (MR);

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

eşitliğinden faydalanılarak hesaplanmıştır.

Tasarımı yapılan üç farklı deney düzeneğinde yapılan; 40 ^{o}C ürün yüzey, 45 ^{o}C kurutma havası sıcaklığı ve 45 ^{o}C ürün yüzey, 50 ^{o}C kurutma havası

sıcaklığında yapılan altı farklı deneyde alınan sonuçlara göre kurutma hızları (DR);

$$DR = \frac{M_{Ctb} - M_{Cts}}{dt} \quad (4)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Aktaş et al (2012). Kurutma sistemde, yoğuşturucudan kurutma havasına verilen ısı miktarı ($\dot{Q}_{KV}$) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$\dot{Q}_{KV} = \dot{m}_{ia} \cdot c \cdot (T_{ia} - T_{aai}) \quad (5)$$

$$\dot{m}_{ia} = \rho_{ia} \cdot \dot{V}_i \quad (6)$$

Karışım havası sıcaklığı (T_{KHS}) sistem için aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$T_{KHS} = \%\dot{V}_1 \ . \ T_1 + \%\dot{V}_2 \ . \ T_2 \quad (7)$$

Yoğuşturucu sıcaklığı (T_K) ile buharlaştırıcı sıcaklığı (T_E) arasında ideal bir soğutma çevrimi için en yüksek ısıtma tesir katsayısı ($COP_{c,h}$) Carnot çevrimi ile aşağıdaki eşitlik ile belirlenir.

$$COP_{c,h} = \frac{T_K}{T_K - T_E} \quad (8)$$

Enerji tüketimi ısı pompasının kompresöründe meydana gelmektedir. Sistemde diğer ekipmanlar da söz konusu olabilir, örneğin fan, pompa vb. Bir ısı pompası sisteminde ısıtma tesir katsayısı (COP_{hp}) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$COP_{hp} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c} \quad (9)$$

Tüm sistem ısıtma tesir katsayısının (COP_{ws}) hesaplanmasında tüketim cihazları için (kompresör, fan, pompa ve diğer ekipmanlar) Eşitlik 10 kullanılır (Ceylan & Aktaş 2008).

$$COP_{ws} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c + \dot{W}_{f1} + \dot{W}_{f2}} \quad (10)$$

Termodinamiğin ikinci yasası hal değişimlerinin herhangi bir yönde değil, fakat belirli bir yönde gerçekleşebileceğini belirtir. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını sağlamayan bir hal değişimi gerçekleşemez. Tersinir bir makine için $Q_H.Q_L^{-1}$ oranı $T_H.T_L^{-1}$ oranıyla yer değiştirebilir. Burada T_H ve T_L sırasıyla yüksek sıcaklıktaki ve düşük sıcaklıktaki ısıl depoların mutlak sıcaklıklarıdır. İş doğrudan ısıya dönüştürülebilir, fakat ısının işe dönüştürülmesi ancak ısı makinelerinin kullanımıyla olabilir (Çengel & Boles 1991).

$$\eta_{th,tr} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (11)$$

Bu T_H ve T_L sıcaklıklarındaki ısıl depolar arasında çalışan bir ısı makinesinin sahip olabileceği en yüksek verimdir. Tersinir soğutma makinesi ve ısı pompasının COP değerleri de benzer biçimde aşağıdaki bağlantılarla verilir;

$$COP_{SM} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \quad (12)$$

$$COP_{IM} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} \quad (13)$$

Bunlar da T_H ve T_L sıcaklık sınırları arasında çalışan bir soğutma makinesinin veya ısı pompasının sahip olabileceği en yüksek etkinlik katsayılarıdır (Çengel & Boles 1991). Bayat ekmeklerin kurutulmasında kullanılan sistem, ısı ve kütle transferi uygulamalarını içermektedir. Sürekli akışlı açık sistem için enerjinin ve kütlenin korunumu kanunu uygulanarak aşağıdaki eşitlikler verilmiştir.

Kütlenin korunumu kanununun genel eşitliği kurutma sistemine uygulandığında;

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (14)$$

Su buharı için kütle korunumunun genel eşitliği;

$$\sum (\dot{w}_i + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{w}_o \quad (15)$$

ya da

$$\sum (\dot{m}_{ia} \cdot \omega_i + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{oa} \cdot \omega_o \quad (16)$$

Enerjinin korunumunun genel eşitliği;

$$\dot{Q}_K - \dot{W} = \sum \dot{m}_{ia} \times (h_{oa} - h_{ia} + \frac{V_o^2 - V_i^2}{2}) \quad (17)$$

eşitlikleriyle hesaplanır. Kurutma işleminde deneyler esnasında anlık alınan frekans değerlerine göre kurutma odasına üflenen havanın debisi ($\dot{V}$) hesaplanırken

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2}=\frac{n_1}{n_2}=\frac{f_1}{f_2} \quad (18)$$

eşitliğinden faydalanılmıştır. Kurutma fırınlarında en önemli verim etkinliği 1 kg nemi buharlaştırmak için harcanması gereken enerjidir. Özgül nem çekme oranı (SMER) olarak tanımlanan bu ifade Eşitlik 19'da olduğu gibi hesaplanır.

$$SMER=\frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_c} \quad (19)$$

Özgül nem çekme oranı ($SMER_{WS}$) tüm sistem için aşağıdaki eşitlik ile;

$$SMER_{WS}=\frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_c+\dot{W}_{f1}+\dot{W}_{f2}} \quad (20)$$

hesaplanır. Deneyler esnasında yapılan ölçümlerde ortaya çıkabilecek hatalar kullanılan cihazların özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Elde edilen deneysel veriler için ölçülen değerlerin doğruluğunu etkileyen en önemli etken ise deneyler esnasında oluşabilecek hatalardır (Kavak 2010). Bu durumda ortaya çıkan hatalar dikkate alınarak toplam hata

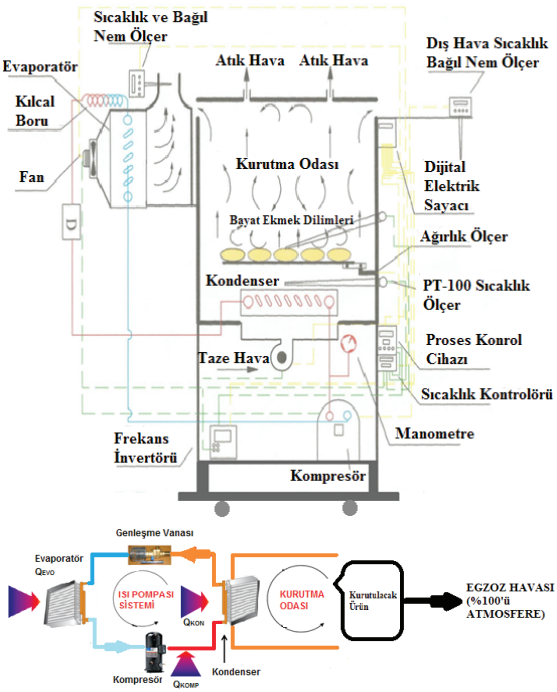
$$W_R=\left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1}w_1\right)^2+\left(\frac{\partial R}{\partial x_2}w_2\right)^2+....+\left(\frac{\partial R}{\partial x_n}w_n\right)^2\right]^{1/2} \quad (21)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

3. Bulgular ve Tartışma

Kurutma odasının ısı kayıpları ve kurutmada ihtiyaç duyulan enerji miktarları hesaplanarak sistem ekipmanlarının kapasiteleri 250 gram bayat ekmek kurutulacak şekilde yapılmıştır. Bu hesaplamalar neticesinde kurutulacak ürün miktarı, kurutma havası sıcaklığı ve teorik kurutma süresine göre ısı pompalı kurutucu için üç tasarım yapılmıştır. Bu üç tasarımda Sistem 1 karşılaştırma yapabilmek için, sistem 2 ve sistem 3'de ısı pompalı kurutucunun performansını değerlendirmek için yapılmıştır. Şekil 1, 2 ve 3'de ısı pompalı kurutma sisteminin tasarlanan üç farklı modu görülmektedir. Isı pompalı kurutma fırını ile PID kontrol yapılarak ürünün kurutma havası sıcaklık değeri ayarlanabilmekte bu da ürünün istenilen şartlarda kurutulmasını sağlamaktadır. Tasarlanıp imalatı yapılan kurutma sistemi kompresör, yoğuşturucu, buharlaştırıcı, dryer, kılcal boru, fan, anemometre, ağırlık ölçer, kurutma odası ve PID kontrol cihazlarından oluşmaktadır. Bu sistemde soğutkan olarak R134a gazı kullanılmıştır. Kılcal boru boyu ve çapı buharlaştırıcı ve yoğuşturucu çalışma sıcaklık değerlerine göre belirlenmiştir.

Şekil 1'de ısı pompalı, kurutma havası sıcaklığı PID olarak kontrol edilen ve aynı zamanda ürün yüzey sıcaklığı aç-kapa olarak kontrol edilen fırının tasarımında görüldüğü üzere; kurutma odası çıkış havası, 1 cm çapındaki altı adet delik yardımıyla ve kapak kenarlarından 0.5 cm boşluk bırakılarak tahliye edilmesi amaçlanmıştır. Böylelikle kurutma havasının ürüne daha fazla nüfuz etmesi düşünülmüştür.

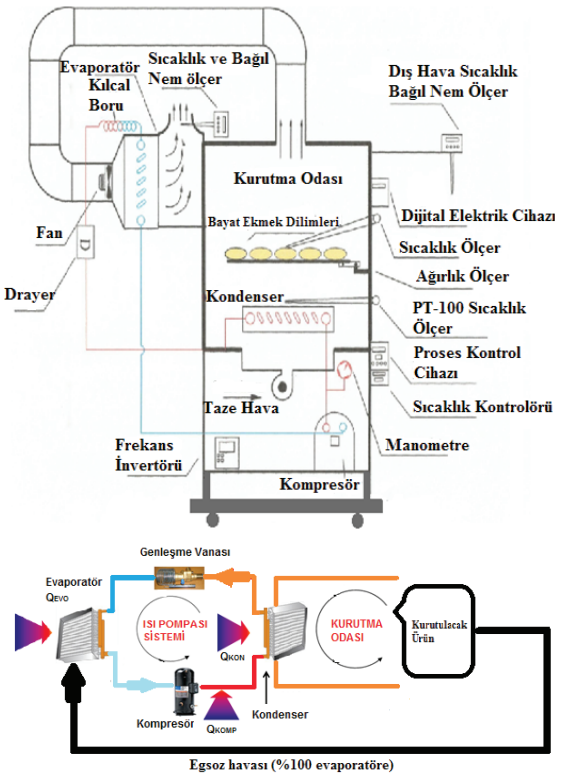


Şekil 1- Isı pompalı bayat ekmek kurutucusu (sistem-1)

Figure 1- Stale bread dryer assisted heat pump (system-1)

Şekil 2'de ısı pompalı kurutma fırınında görüldüğü üzere; kurutma odası çıkış havasının

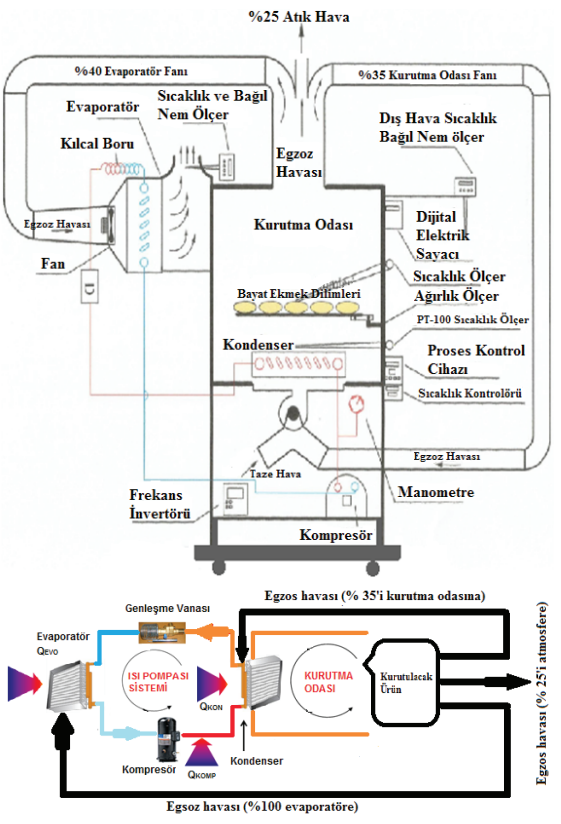
tamamı buharlaştırıcıya gönderilmiştir. Bu tasarımda sistemdeki buharlaştırıcıya kurutma odası çıkış havası gönderilerek buharlaştırıcının ısı çekme potansiyeli arttırılmıştır.



Şekil 2- Isı pompalı bayat ekmek kurutucusu (sistem-2)

Figure 2- Stale bread dryer assisted heat pump (system-2)

Şekil 3'de karışım havalı bir kurutma sistemi tasarlanmıştır. Bunun amacı kurutma odasından çıkan havanın ısısından faydalanmaktır. Kurutma odasından çıkan hava psikrometrik olarak kurutma yeteneği az olan bir havadır. Bu yüzden hem bu havanın ısısından faydalanmak hem de kurutma verimliliğini arttırmak için çeşitli psikrometrik analizler yapılmıştır. Tasarlanan bu kurutucu için çalışma sıcaklıkları ve kurutulan üründen alınacak nem miktarına göre kurutma odası çıkış havasının bir kısmı (% 40) buharlaştırıcıya, bir kısmı (% 25) atmosfere ve bir kısmı da (% 35) tekrardan kurutma odasına gönderilmiştir. Bu oranlar kurutma süresi ve enerji tüketimi açısından optimize edilmiştir. Bu oranlar kurutulacak ürünün cinsine ve çalışma sıcaklıklarına göre değişebilir. Sistem 3'ün tasarımında buharlaştırıcının ısı çekme potansiyeli sistem 1'e göre artarken sistem 2'ye göre biraz daha azaldığı görülmüştür. Kurutma odası çıkış havasının, hesaplanan çaplardaki kanallar yardımıyla, belirli hızlarda ve belirli oranlarda akması sağlanmıştır. Isı pompalı kurutma sisteminde kurutma odası, üfleme havası sıcaklığı PID kontrol ve ürün yüzey sıcaklığı aç-kapa kontrol edilerek yapılan deneylerde uygun üfleme havası sıcaklığı ve ürün yüzey sıcaklığı kontrol altına alınmıştır. Ürün ağırlık değişimleri kurutma sistemi durdurulmadan ağırlık ölçer yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Isı pompalı kurutma sisteminin imalatında kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 3- Isı pompalı bayat ekmek kurutucusu (sistem-3)

Figure 3- Stale bread dryer assisted heat pump (system-3)

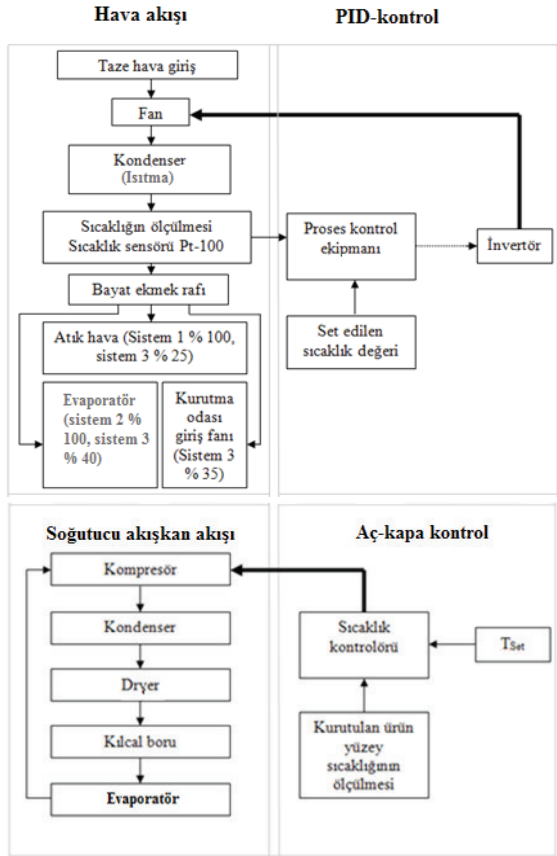
Çizelge 1- Kurutucuda kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikleri

Table 1- Equipments used in dryer and technical properties

Kullanılan cihaz	*Teknik özellikleri*
Kompresör	1/3 HP, R 134a, 220-240 V
Buharlaştırıcı	1/3 HP
Yoğuşturucu	1/2 HP
Frekans invertörü	AC değişken hız sürücüsü, 0,25 kW - 4 kW, 0,33 HP-5 HP
Dijital elektrik sayacı	Geniş aralıklı hassas ölçüm, çok tarifeli, 50 Hz, 220 V, hassasiyeti ±%1
Proses kontrol ekipmanı	4 W,100-240 V AC,Transmitter kaynağı 24 V DC, PID kontrol
Salyangoz fan	125 W, 350 m^3/h, 2600 d/d, 50 Hz, 230 V IN: 0,45A

Şekil 4'de görüldüğü gibi sistemde hava ve soğutucu akışkan akışının, sırasıyla PID ve aç-kapa kontrol sisteminin ilişkisi gösterilmiştir. Ölçülen sıcaklık değeri ve set edilen sıcaklık değeri arasındaki farka göre invertör salyangoz fana kumanda etmektedir. Kurutma sisteminde kurutma havası sıcaklık set edilen değerde tutulmuştur. Böylelikle sistemde kurutma esnasında olabilecek sıcaklık dalgalanmalarına sebebiyet verilmemektedir. Sistemde ölçülen ürün yüzey sıcaklık değeri ile set edilen sıcaklık değeri birbirine eşit olduğunda, sıcaklık kontrolörü tarafından kompresör durdurulmuştur. Hava akışı diyagramında da görüldüğü gibi, set edilen sıcaklık değerindeki kurutma havası ürün üzerinden geçtikten sonra; 1. sistemde tamamen egzoz edilecek, 2. sistemde egzoz havasının tamamı buharlaştırıcı yüzeyine gönderilecek, 3. sistemde ise egzoz havası belirli oranlarda üç'e ayrılıp fan, buharlaştırıcı ve egzoz kanalına gönderilmiştir.

Tasarlanan üç ayrı kurutma sisteminde ve her sistem için 2 ayrı modda (40 °C ürün yüzey, 45 °C kurutma havası sıcaklığı (A) şartı ve 45 °C ürün yüzey, 50 °C kurutma havası sıcaklığında (B) şartı) deneyler yapılmak üzere toplam 6 deney yapılmıştır. Set edilen değere göre kurutma havası sıcaklığı PID olarak kontrol edilip, aynı zamanda kurutulan ürün yüzey sıcaklığı da kontrol edilmiştir. Kurutma havası sıcaklıkları 45-50 °C ve kurutulan ürün yüzey sıcaklıkları 40-45 °C olarak belirlenmiştir. 40 °C ürün yüzey 45 °C kurutma havası ve 45 °C ürün yüzey 50 °C kurutma havası sıcaklıklarında sistem 1, 2 ve 3'de deneyler yapılmıştır. Deneyler esnasında



Şekil 4- Hava akışı ve otomatik kontrol detayı

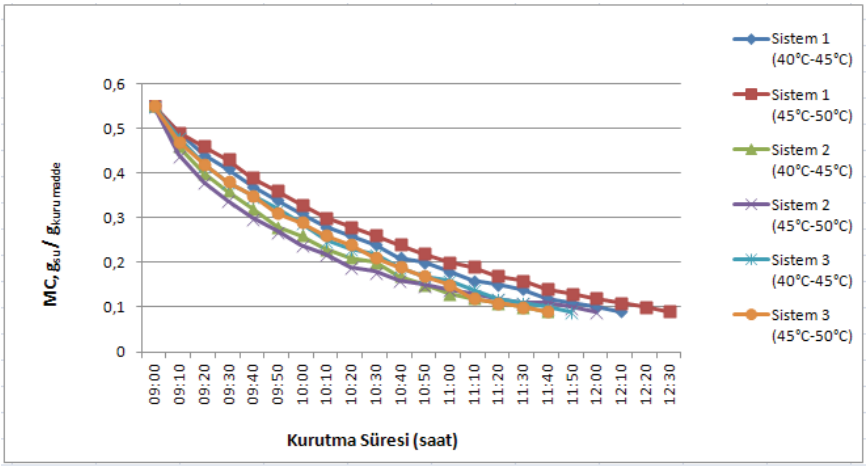
Figure 4- Detail of air flow and automatic control

kullanılan cihazlar, cihazların teknik özellikleri ve toplam hata miktarları Eşitlik 22'den hesaplanarak Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2- Deneyler esnasında kullanılan cihazlar, teknik özellikleri ve toplam hata değerleri

Table 2- The devices used during the experiments, technical properties and total error values

Ekipmanlar	*Teknik özellikleri*	*Hassasiyet*	*Toplam hata*
Dijital tartı	Mettler Toledo, Max. 6100 g ölçüm miktarı	±0.01 g	±0.014 g
Bağıl nem ve sıcaklık sensörü	Ordel, HTC08 model, 0-100 % bağıl nem aralığı -40….+120 °C sıcaklık aralığı	± % 2 ±1 °C	± % 2.22 ± 1.173 °C
Yük hücresi	Zemic, L6D model, Nominal çıkış	± % 0.02 g	± % 0.035 g
Su aktivitesi ölçüm cihazı	Testo, 650 model, a_w değeri 0–1 arası	± 0.001	± 0.002
Isıl çift	Skala 0-70 °C, çıkış 4-20 mA	± 0.1 °C	± 0.15 °C
Hava hızı ölçüm cihazı	Testo, 625 Model, 0-20 m/s aralığı	± 0.01 m s^{-1}	± 0.02 m s^{-1}



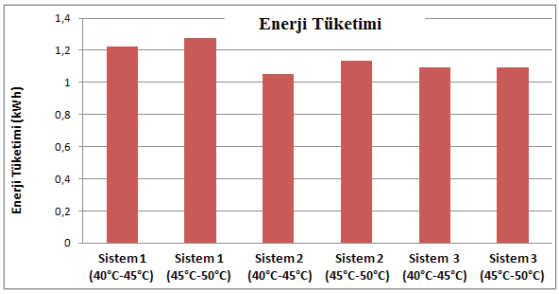
Şekil 5- Deneyler esnasında bayat ekmeğin nem içeriğinin değişimi

Figure 5- Moisture content changes of stale bread during the experiments

Kuru ağırlığı belirlenen bayat ekmeklerin başlangıç nem miktarı kuru baza göre Eşitlik 1'den hesaplanarak başlangıç nem miktarı 0.55 $g_{su}.g_{kuru\ madde}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Yapılan deneyler süresince bayat ekmeklerin kuru baza göre nem miktarının değişimi Şekil 5'de gösterilmiştir. Bayat ekmek dilimleri bütün deneylerde karşılaştırma yapılabilmesi için 0.55 $g_{su}.g_{kuru\ madde}^{-1}$ miktarından 0.09 $g_{su}.g_{kuru\ madde}^{-1}$ miktarına indirilmiştir. Ürün yükleme miktarları kurutma uygulamalarında oldukça önemlidir. Bu çalışmada bütün deneylerde yükleme miktarı m^2 başına 2.77 kg olmuştur.

Şekil 6'da görüldüğü gibi sistem 1'in enerji tüketimi sistem 2 ve sistem 3'e göre daha fazla olmuştur. Bunun en temel nedeni sistem 2 ve sistem 3'te kurutma odası çıkış havası ısısından faydalanılması, sistem 1'de faydalanılmamasıdır. Şekil 6'da görüldüğü gibi sistem 3'deki hava dağılımları sistem 3'ün sistem 1'e göre enerji tüketim miktarının azalmasına neden olmuştur. Sistem 2'deki enerji tüketiminin sistem 3'den az olmasının nedeni ise sistem 3'de kurutma odası dönüş havasının bir kısmını (% 35) tekrar kurutma odasına gönderilmesinden dolayı, kurutma odasına giren havanın bağıl nem değerinin sistem 2'ye

göre daha fazla olması, kurutma süresinin ve enerji tüketiminin artmasına neden olmuştur. Ayrıca sistem 3 de kurutma odası çıkış havasının % 40'lık kısmının buharlaştırıcıya gönderilmesi sistem 2'ye göre buharlaştırıcının daha az ısı çekerek, soğutucu gazın sıcaklığının daha düşük sıcaklıklarda kompresöre gönderilmesinden dolayı sistem 2'ye göre daha fazla enerji harcamasına neden olmuştur. Bu durum deney sonuçlarına göre yapılan termodinamik analizlerde de görülmüştür, Şekil 8'de 3 sistem için kompresör işleri taslak olarak gösterilmiştir.

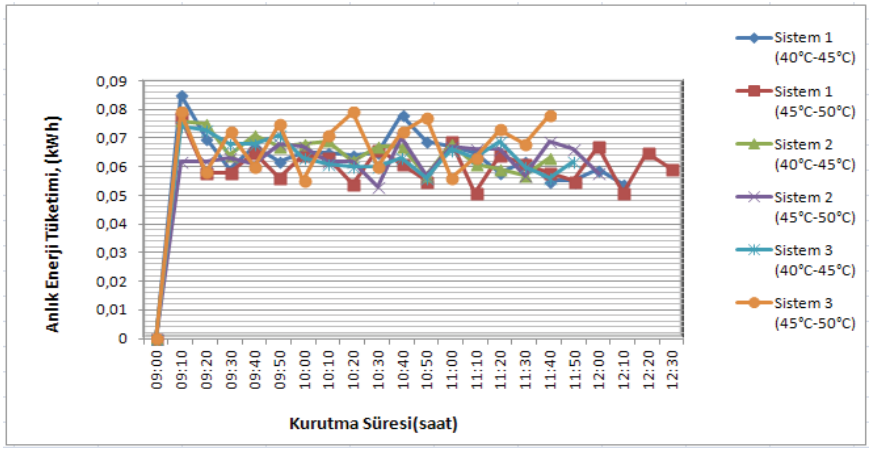


Şekil 6- Deneylerin sonunda toplam enerji tüketimi değerleri

Figure 6- Total energy consumption values at the end of the experiments

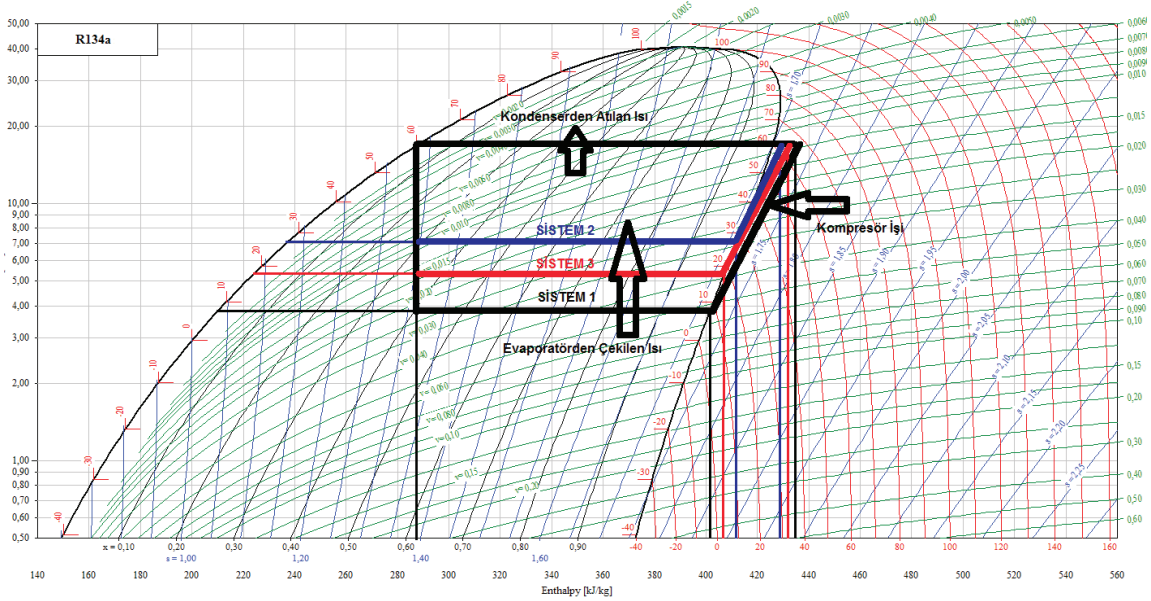
Şekil 7'de görüldüğü gibi yapılan deneylerde zamana göre enerji tüketimlerinde farklılıklar gözlemlenmektedir. Bunun nedeni PID olarak istenilen üfleme havası sıcaklığına göre, frekans invertörü sayesinde fanın devrinin anlık yükselip düşmesinden kaynaklanmıştır. Ayrıca buna ek olarak aç-kapa kontrol ile istenilen ürün yüzey sıcaklığına ulaşıldığında kompresör devreden çıkarak set edilen ürün yüzey sıcaklık değerinin üstüne çıkılmamıştır. Kompresör devreden çıktığı sürece sadece fanların tükettiği enerji söz konusu olduğundan enerji tüketiminde anlık değişimler olmuştur. Sistem 2'de buharlaştırıcının kurutma odasından çıkan havayı ısı kaynağı olarak kullandığından sistem performansı artmıştır. Yapılan sıcaklık ölçümlerine göre R134a soğutucu akışkanın sistem 1, 2 ve 3 için çevrimi taslak olarak Şekil 8'de çizilerek verilmiştir. Yine sistem 3'de kurutma havasının kurutma odasından çıktıktan sonra bir kısmı (% 40) buharlaştırıcıya, bir kısmı (% 35) tekrar kurutma odasına ve kalan kısmı da (% 25) dışarı atılmıştır.

Su aktivitesi değeri kurutulan ürünlerin saklanma koşulları ile ilgili ve su aktivitesi değerine göre kurutulan ürünlerde küf, maya ve bakteri oluşumu gibi bozulmaların olup olmayacağı konusunda bize bilgi vermektedir. Kurutulan bayat ekmek dilimlerinin su aktivitesi değerleri (a_w) ortalama 0.370 olarak ölçülmüştür. Bu nedenle, kurutulmuş ürün depolamaya hazır hale getirilmiştir.



Şekil 7- Deneyler esmasında anlık enerji tüketim değerleri

Figure 7- Instantaneous energy consumption values during the experiments



Şekil 8- Deneysel sonuçlara göre ısı pompası çevriminin taslak Log P-h diyagramı

Figure 8- Draft LogP-h diagram of heat pump cycle according to experimental results

Bu çalışmanın amacı, kurutma sistemlerinde enerji verimliliğini sağlamaktadır. Bu yüzden kurutucularda ısı pompası kullanıldığında performans artışına etki eden unsurlara yönelik farklı sistemler test edilmiştir. Yapılan araştırmalar doğrultusunda sanayide kullanılan kurutma sistemlerinde genellikle elektrikli ısıtıcı ve fosil yakıtlı (doğalgaz, LPG, kömür, vb.) kurutucular mevcuttur. Deney sonuçları doğrultusunda yapılan hesaplamalar sonucunda COP değerlerine bakıldığında sistemin konvansiyonel kurutuculara nazaran ortalama % 40-50 daha az enerji tükettiği hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmalarda sistemde kondenser çalışma basıncı en yüksek 14-17 bar arasında değişmiştir. Deney verilerinin incelenmesi sonucunda yoğuşturucu sıcaklığının 60 ^{o}C olduğu buharlaştırıcı sıcaklığının ise Sistem 1 için 7-11 ^{o}C Sistem 2 için 17-28 ^{o}C ve Sistem 3 için ise 15-21 ^{o}C arasında değiştiği görülmüştür. Alınan bu sonuçlar doğrultusunda termodinamik hesaplamalar yapılarak COP değerleri ortaya çıkmıştır.

Şekil 8'de görüldüğü gibi kondenserden atılan ısı ile kurutma havası ısıtılmış, kondenserden çıkan soğutucu gaz kılcal borudan geçerek buharlaşma basıncına düşürülmüştür. Her üç sistemde hava kaynaklı ısı pompası sistemi olup, deneylerde kaynak sıcaklıkları farklı değerlerde olmuştur. Bu kaynak sıcaklıklarının değişimi performansa etki eden en önemli parametre olmuştur.

Sistem 1'in, sistem 2 ve sistem 3'e göre daha fazla enerji harcadığı görünmektedir. Bunun nedeni, kurutma odası çıkış havasının buharlaştırıcı yüzeyine değil de direkt egzoz edilmesinden kaynaklanmıştır. Sistem 2'nin sistem 3'den daha az enerji tüketmesinin nedeni ise sistem 2'nin dönüş havasının % 100'ünden faydalanılmasıdır. Sistem 3'de kurutma odası çıkış havasının bir kısmı (% 40) buharlaştırıcıya, bir kısmı (% 35) tekrar kurutma odasına gönderildiği için, kurutma odasına giren havanın bağıl nem oranının sistem 2'ye göre daha yüksek olmasından kurutma süresi az da olsa uzamıştır ve enerji sarfiyatı artmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda bayat ekmeklerdeki nem oranının kurutma süresine göre değişimleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Elde edilen verilerin sonuçlarına göre üründeki nem oranı değişimleri birbirlerine yakın iken sistem 2B deneyinde başlangıçta nem oranı değişiminin diğerlerine göre daha hızlı olduğu kurutma süresinin sonuna doğru da sistem 3B deneyi nem oranı değişiminin hızlandığı görülmektedir.

Şekil 10'da görüldüğü gibi, deneysel analizleri yapılan üç ayrı sistemin de kurutma hızlarına bakıldığında sistem 1'in diğer sistemlere göre performansının daha düşük olduğu görülmüştür. Sistem 2 ile sistem 3 kurutma hızları bakımından karşılaştırıldığında sistem 2A'nın daha hızlı olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, sistem 3B'de kurutma odasından çıkan nem alma potansiyeli düşük havanın, tekrardan dış hava ile belirli oranlarda karıştırılarak kurutma odasına gönderilmesinden kaynaklanmıştır. Sistem 3B'nin sistem 2A'yı deneyin sonlarına doğru yakalamasının nedeni kurutulan üründen çekilen nem içeriğinin giderek azalması sonucunda sistem 3 B'de kurutma odasına giren havanın nem alma kapasitesinin deneyin sonlarına doğru artmasından kaynaklanmıştır. Yapılan deneyler A ve B şartlarında yapılmıştır.

Deney sonuçlarına göre COP_{ws} Eşitlik 10' a göre hesaplanmış ve şu sonuçlara ulaşılmıştır; sistem 1A 2.84, sistem 1B 2.96, sistem 2A 4.28, sistem 2B 5.28, sistem 3A 4.64, sistem 3B 4.74, sonuçlarına ulaşılmıştır.

Şekil 11'de görüldüğü üzere COP_{ws} en düşük olduğu deney sistem 1A iken en yüksek olduğu deney sistem 2B'dir (Çizelge 3).

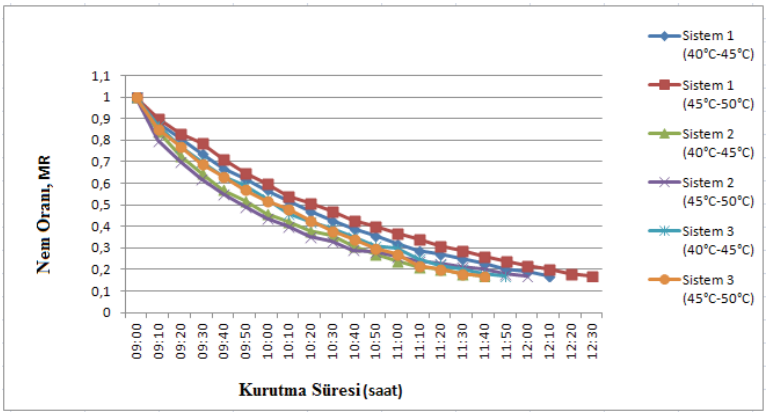
Deney sonuçlarına göre COP_{hp} Eşitlik 9'a göre hesaplanmış ve şu sonuçlar bulunmuştur; sistem 1A 3.41, sistem 1B 3.39, sistem 2A 4.81, sistem 2B 5.65, sistem 3A 4.96, sistem 3B 5.31, sonuçlarına ulaşılmıştır. Görüldüğü üzere COP_{hp} en düşük olduğu deney sistem 1B iken en yüksek olduğu deney sistem 2B'dir (Çizelge 3). Isı pompalı, bayat ekmek kurutma deneyinde $SMER_{ws}$ Eşitlik 19'a göre hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçlarına göre $SMER_{ws}$ en düşük olan sistemin sistem 1B iken en yüksek $SMER_{ws}$ ise sistem 2A olduğu görülmüştür. Sistem fanı ve buharlaştırıcı fanının enerji tüketimleri, toplam enerji tüketiminden çıkartılarak hesaplanan $SMER_{hp}$ için; en düşük $SMER_{hp}$ sistem 1B iken en yüksek $SMER_{hp}$ ise sistem 2A'da olduğu görülmüştür.

Kurutma sistemlerinde ana problemlerden birisi de kurutma odasında homojen olmayan sıcaklık dağılımlarıdır. Bu durum düşünülerek tasarım

Çizelge 3- Deneysel sonuçlar

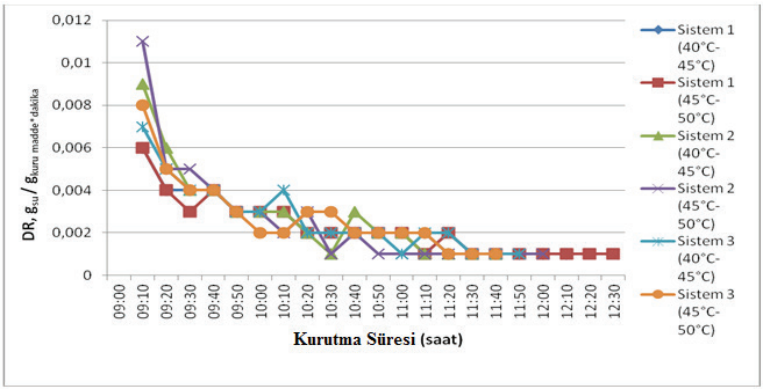
Table 3- Experimental results

	Sistem 1		*Sistem 2*		*Sistem 3*	
Deney şartı	*A*	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*
COP_{ws}	2.84	2.96	4.28	5.28	4.64	4.74
COP_{hp}	3.41	3.39	4.81	5.65	4.96	5.31
$SMER_{ws}$ (g kWh^{-1})	60.46	57.95	70.41	65.14	67.7	67.52
$SMER_{hp}$ (g kWh^{-1})	73.87	66.26	79.1	73.74	76.73	75.5
25 °C'de ölçülen su aktivitesi değeri (a_w)	0.395	0.388	0.366	0.356	0.368	0.346
Ortalama ürün yüzey sıcaklığı °C	37.5	38.6	36	39.9	37.7	41.5
Ortalama kurutma havası sıcaklığı °C	44.9	49.3	44.7	49.6	44.9	49.5
Min. - Max. hava hızları (m s^{-1})	0.27-0.45	0.27-0.39	0.33-0.61	0,32-0,65	0,31-0,66	0,32-0,63
Ortalama hava hızları (m s^{-1})	0.36	0.31	0.53	0.54	0.54	0.53



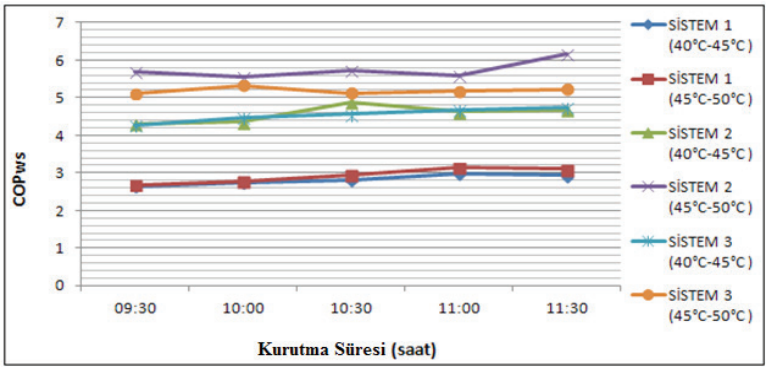
Şekil 9- Deneyler esnasında nem oranının değişimi

Figure 9- Moisture ratio changes during the experiments



Şekil 10- Bayat ekmeğin deneyler esnasında kurutma hızı değerleri

Figure 10- Drying rate values of stale bread during the experiments



Şekil 11- COP_{WS} değerlerinin deneyler esnasında değişimi

Figure 11- Changes of COP_{WS} values during the experiments

gerçekleştirilmiştir. Fırın içerisine yerleştirilen Pt-100 ile kurutma havası sıcaklığı PID olarak kontrol edilmiştir. Fırın ebadı ile kondenser ebadı ve tepsi ebadı birbirlerine uygundur. Bu ebatlar yapılan termodinamik hesaplamalar sonucunda belirlenmiştir. Bu çalışmaların sonucu olarak sistemde homojen bir hava dağılımı gözlemlenmiştir.

Kurutulan bayat ekmekler kurutma sonrası nem çekmeyen bir kabın içinde bekletilmiştir. Bayat ekmeklerin su aktivitesi değeri (a_w) 25 ^oC oda sıcaklığında TESTO 650 su aktivitesi ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Bu işlemler altı farklı deneyde kurutulan bayat ekmekler için yapılmış sonuçlar Çizelge 3'te verilmiştir. Yapılan deneylerde sistem 1'de ortalama hava hızı (0.31-0.36 m s^{-1}) sistem 2 ve 3'e göre düşük olduğundan dolayı yoğuşturucudan atılan ısı ($\dot{Q}_{KV}$) azalmış bu da sistem 1'in performans katsayısını düşürmüştür.

Yapılan bu çalışmada kurutma sonlarına doğru, bayat ekmek dilimlerindeki nem içeriklerinin azalmasından dolayı ürün yüzey sıcaklığında hızlı bir artış olacağı bilinmektedir. Bundan dolayı kurutulan bayat ekmeklerin rengi pembeleşecektir hatta yüzeylerinde kararma olacaktır. Bu olayın yaşanmaması için kurutulan ürünün yüzey sıcaklığı kontrol edilmiştir. Ürün yüzey sıcaklığı set değerini sistem yakaladığı an kompresör devreden çıktığı için, kurutma odası sıcaklığı kompresörün devreden çıktığı anlarda bile PID kontrol sayesinde frekans invertörünün fan devrini ayarlamasıyla kurutma odası üfleme sıcaklığı set değerinde kalmasını sağlamıştır.

Yapılan bu çalışma ile kurutulan bayat ekmeklerin teknik kurutma ile yılın 12 ayı kurutma yapılabilmesi sağlanabilmektedir. Yapılan duyusal analizler, su aktivitesi ve nem miktarı değerleri açısından da kurutulan bayat ekmeklerin istenen özelliklerde olduğu görülmüştür. Yapılan deneylerde 40 ^oC ürün yüzey sıcaklığında yapılan deneylerde ortalama ürün yüzey sıcaklığı 37.1 ^oC ve 45 ^oC ürün yüzey sıcaklığında yapılan deneylerde de ortalama ürün yüzey sıcaklığı 40.0 ^oC olarak ölçülmüştür. Bu deneylerde ürün yüzey sıcaklığı kontrolü başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

4. Sonuçlar

Tasarlanan, imal edilen ve deneysel olarak analizi yapılan, ısı pompası destekli otomatik kontrollü kurutma fırınında bayat ekmek kurutulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda, sistem 2B'de yapılan deneylerin diğer sistem şartlarında yapılan deneylere göre daha yüksek COP_{ws} değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, bayat ekmeğin kurutulmasındaki en ideal sistem ve sıcaklık değerinin sistem 2A olduğu tespit edilmiştir. Ürün daha yüksek sıcaklıklarda da kurutulabilirdi ancak hem enerji tasarrufu açısından hem de ürün yüzeyinde bozulmalar gerçekleşmemesi için 50 ^oC'nin altındaki ürün yüzey sıcaklık değerleri (40 °C-45 °C) tercih edilmiştir. Sistem 3'ün sistem 2'ye göre dezavantajı; kurutma odasından çıkan nem alma potansiyeli düşük havanın dış hava ile belirli oranlarla (% 35) karıştırılıp sisteme tekrar verilmesinden dolayı sistem 3'ün kurutma süresi uzamış buna bağlı olarak enerji sarfiyatı sistem 2'ye göre artmıştır. Sistem 3'ün kurutma safhasının son anlarında diğer sistemlere göre daha verimli olduğu görülmüştür. Bunun nedeni kurutulan üründen çekilen nem miktarının deneyin sonlarına doğru azalması sonucunda daha düşük bağıl nemdeki hava kurutma kabinini terk etmiş ve sistem 3'de kurutma kabinini terk eden bu hava tekrardan kurutma kabinine gönderilmiştir.

Yapılan 6 deneyde ortalama kurutma süresi 2.9 saattir. Hava hızı ve sıcaklığının arttırılması ile bu süre düşecektir fakat enerji tüketimi artacaktır. Bu deneysel çalışmada hem kurutma havası sıcaklığı hem de kurutulan ürün yüzey sıcaklığı kontrol edilmiştir. Kurutma esnasında ürün yüzey sıcaklığının kontrolü kurutulan ürünün kalitesi için önemli bir özelliktir. Ürün yüzey sıcaklığı kontrol edilerek ürünlerdeki sıcaklıktan dolayı oluşabilecek yüksek sıcaklığa bağlı olabilecek bozulmaların önüne geçilmiştir. Ürün yüzey sıcaklığı set değerini sistem yakaladığı an kompresör devreden çıktığı

için, kurutma odası sıcaklığı kompresörün devreden çıktığı anlarda bile PID kontrol sayesinde frekans invertörünün fan devrini ayarlamasıyla kurutma odası üfleme sıcaklığı set değerinde kalmasını sağlanmasıdır.

Çalışmada, kurutma odasından atılan duyulur ve gizli ısısı yüksek havanın tekrar değerlendirilerek ısı pompalı kurutucunun performans katsayısı artmış ve kurutma süresi kısalmıştır. Aslında bu durum bilinen bir gerçektir, bu çalışmada ısı pompası sisteminde PID kontrol ile istenilen sıcaklıkta kurutma havası elde edilmiş ve aynı zamanda ürün yüzey sıcaklığı kontrol edilmiştir. Bu sistemde yapılan 6 deneyde kurutma odası sıcaklığı ortalama ± 0.35 °C hassasiyet ile istenilen değerde tutulmuştur. Kompresörün devreden çıktığı anlarda bile sıcaklığın set edilen değere yakın olduğu gözlemlenmiştir. PID kontrol için ortalama ± 0.35 °C değeri kompresörün devrede olmadığı anlardaki dalgalanmadan kaynaklanmıştır. Kompresör devrede değilken sıcaklığın set edilen değerde kalması için frekans invertörünün kurutma odası girişindeki fanın devrini kısması ile sağlanmıştır.

Deney sonuçlarına göre yapılan hesaplamalarda elde edilen COP_{hp} ve COP_{ws} değerlerinin, Çizelge 4'de, literatürde yapılan bazı çalışmalar ile kıyaslandığında görüldüğü gibi yapılan çalışmada elde edilen performans katsayısı değerlerinin oldukça iyi olduğu görülmüştür. Enerji verimliliği açısından, kurutma odası çıkış havasının tamamının buharlaştırıcı yüzeyine gönderilmesiyle kurutma odası çıkış havasının ısısından faydalanmak üzere tasarlanan sistem 2'nin ve kurutma odası çıkış havasının ısısından belirli oranlarla hem buharlaştırıcı yüzeyine hem de kurutma odası giriş havasına gönderilmek üzere tasarlanan sistem 3 yüksek performans katsayılarından dolayı ısı pompalı kurutuculara örnek bir model olacaklardır. Sistem 3'de kurutma uygulamalarına bir model olabilir hatta kurutma evrelerine göre otomatik kontrol ile buharlaştırıcıya ve kurutma odasına tekrar giden hava debileri ayarlanabilir. Yapılan bu prototip sistemler, endüstriyel çalışmalara örnek olabilir ve kurutulan bayat ekmekler uygun teknikler ile gıda maddesi olarak tekrar kullanılabilir. Sisteme hem ısıl hem de fotovoltaik panellerle güneş enerjisi desteği verilebilir.

Çizelge 4- Bazı literatür çalışmalarından COP_{ws} ve COP_{hp} değerleri

Table 4- COP_{ws} and COP_{hp} values from some literature studies

Çalışma	COP_{ws}	COP_{hp}
Gönen (2012)	3.02	-
Best et al (1994)	-	5.30
Oktay ve Hepbaşlı (2003)	2.47-3.95	-
Chaturvedi et al (1998)	-	2.5-4.0
Söylemez (2006)	2.36	-
Huang et al (2005)	2.58-3.32	-
Şevik et al (2013)	2.1-3.1	-
Guoying et al (2006)	3.98-4.32	-
Trilliant-Berdel et al (2006)	-	3.75
Li et al (2010)	5.19	-

Değişken hava debili ve sabit sıcaklık prensibine göre uygulanan bu sistem ile kurutma odasında hassas sıcaklık kontrolü yapılmıştır. Isı pompası termodinamiği ile değişken hava debili kurutma sistemi entegre edilerek sistem verimli bir şekilde uygulanmıştır. Sistem 2 ve 3 modeli, sabit hava debisinin olduğu ve frekans invertörlü bir kompresöre sahip ısı pompası sistemi ile de bu çalışmada olduğu gibi ciddi oranda enerji tasarrufu yapılabilecektir. Bayat ekmekler yürüyen bantlı bir sistemde hareket ettirilerek endüstriyel boyutta kurutma uygulamaları yapılabilir. Yapılan bu sistemde, kurutma süresinin kısaltılabilmesi için sistem kızılötesi (infrared) kurutma teknolojisi entegre edilebilir. Bu sistem ile farklı ürünlerin de (üzüm, fındık, kivi vb.) uygun psikrometrik şartlarda kurutulabilmesi mümkün olabilir. Isı pompası sistemleri sadece kurutma sistemlerinde değil sıcaklık ve bağıl nem kontrolünün yapıldığı daha başka enerji sistemlerinde de başarılı ve verimli bir şekilde kullanılabilir.

Kısaltmalar ve Semboller	
a_w	su aktivitesi
c	havanın özgül ısısı (kJ (kg $^oC)^{-1}$)
dt	dakika
f	frekans (Hz)
f	fugasite
$\dot{m}$	kütlesel debi (kg s^{-1})
$\dot{m}_d$	birim zamanda buharlaştırılan nem (kg h^{-1})
n	devir sayısı (devir dakika^{-1})
R	ölçülmesi gereken büyüklük
T	sıcaklık (^oC)
T_E	buharlaştırıcı sıcaklığı (^oC)
T_K	yoğuşturucu sıcaklığı (^oC)
T_H	yüksek sıcaklıktaki ısıl depo sıcaklığı (^oC)
T_L	düşük sıcaklıktaki ısıl depo sıcaklığı (^oC)
T_{KHS}	karışım havası sıcaklığı (^oC)
t	zaman (s)
$\dot{Q}$	birim zamanda verilen enerji (kW)
$\dot{W}_C$	kompresör gücü (kW)
$\dot{Q}_E$	buharlaştırıcı (evaporatör) kapasitesi (kW)
$\dot{Q}_K$	yoğuşturucu gücü (kW)
$\dot{Q}_{KV}$	yoğuşturucudan kurutma havasına verilen enerji (kW)
SO_{KA}	ürünlerdeki kuru ağırlığa göre nem miktarı (kg_{su} $kg_{kuru\ madde}^{-1}$)
SO_{YA}	ürünlerdeki yaş ağırlığa göre nem miktarı (kg_{su} $kg_{yaş\ madde}^{-1}$)
$COP_{c,h}$	carnot çevrimine göre ısıtma tesir katsayısı
COP_{hp}	ısı pompasının ısıtma tesir katsayısı
COP_{ws}	bütün sistemin ısıtma tesir katsayısı
COP_{IM}	ısıtma tesir katsayısı
COP_{SM}	soğutma tesir katsayısı
$SMER_{ws}$	tüm sistemin özgül nem çekme oranı (kg kWh^{-1})
$SMER_{hp}$	ısıtma sisteminin özgül nem çekme oranı (kg kWh^{-1})
ω	özgül nem (g_{su} $g_{kuru\ hava}^{-1}$)
$\dot{w}_i$	giren havanın su buharı miktarı (kg s^{-1})
x	bağımsız değişken
w	hata oranı
W_R	toplam hata
W	yapılan iş (kJ)
$\dot{W}_{f1}$	buharlaştırıcı fanı gücü (kW)
$\dot{W}_{f2}$	kurutma odası giriş fanı gücü(kW)
o	çıkış
oa	çıkış havası
PID	oransal, integral, türevsel
TMO	toprak mahsulleri ofisi
YA	yaş ağırlık
ws	tüm sistem

Kaynaklar

Akpınar E K (2004). Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer. *Int. Comm. Heat and Mass Transfer* **31**(8): 1165-1176

Aktaş M (2007). Isı pompası destekli fındık kurutma fırınının tasarımı, imalatı ve deneysel incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Basılmış), Ankara

Aktaş M, Şevik S, Doğan H & Öztürk M (2012). Fotovoltaik ve termal güneş enerjili sürekli bir kurutucuda domates kurutulması. *Tarım Bilimleri Dergisi-Journal of Agricultural Sciences* **18**: 287-298

Aktaş M, Aktekeli Z, Doğan H & Ceylan İ (2010). Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı kırmızı biber kurutucusunun tasarımı, imalatı ve performans deneyleri. *Journal of Thermal Sciences and Technology* **30**(1): 111-120

Best R, Soto W, Pilatowsky I & Gutierrez L J (1994). Evaluation of a rice drying system using a solar assisted heat pump. *Renew Energy* **5**(1–4): 465–468

Cemeroğlu B, Karadeniz F & Özkan M (2003). Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi. Gıda Teknolojisi Derneği, Ankara, s. 541–542, 544-570

Ceylan İ & Doğan H (2004). Nem kontrollü kondenzasyonlu kereste kurutma fırını. *II.Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi,* Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 155- 166

Ceylan İ & Aktaş M (2008). Isı pompası destekli bir kurutucuda fındık kurutulması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University,* **23**(1): 215-222

Çengel Y & Boles M (1991). Carnot çevrimi. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik Kitabı, Literatür Yayıncılık, İstanbul, s. 237-249

Chaturvedi S K, Chen D T & Kheireddne A (1998). Thermal performance of a variable capacity direct expansion solar-assisted heat pump. *Energy Convers Manage* **39**(3/4): 181–91

Doğan V (2003). Su-toprak kaynaklı ısı pompalarının araştırılması. *Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi* 57-71

Fatouh M, Metwally A B, Helali A & Shedid M H (2006). Herbs drying using a heat pump dryer. *Energy Conversion and Management* **47**(15-16): 2629-2643

Gönen E (2012). Isı pompası destekli PLC kontrollü bir kurutucuda defne yaprağı kurutulması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Bölümü (Basılmış), Ankara

Guoying X, Xiaosong Z & Shiming D A (2006). Simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater. *Applied Thermal Engineering* **26**: 1257–65

Hawlader M N A & Jahangeer K A (2006). Solar heat pump drying and water heating in the tropics. *Solar Energy* **80**(5): 492-499

Huang B J, Lee J P & Chyng J P (2005). Heat-pipe enhanced solar-assisted heat pump water heater. *Sol Energy* **78**: 375–81

Kavak Akpınar E (2010). Drying of mint Leaves in a solar Dryer and Under Open Sun: Modelling, Performance Analyses. *Energy Conversion and Management* **51**: 2407-2418

Lee K H & Kim O J (2009). Investigation on drying performance and energy savings of the batch-type heat pump dryer. *Drying Technology* **27**: 565-573

Li H, Dai Y, Dai J, Wang X & Wei L (2010). A solar assisted heat pump drying system for grain in-store drying. *Front Energy Power Engineering* **4**(3): 386–91

Oktay Z & Hepbaşlı A (2003). Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer. *Energy Conversion and Management* **44**: 1193-1207

Oktay Z (1997). Isı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkiyen etkenlerin araştırılması. Makine Mühendisleri Yayını**,** Teskon Program Bildirileri, *Soğ* **047**: 750-759

Söylemez M S (2006). Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery. *Journal of Food Engineering* **74**: 292-298

Süzer S (2013). Buğday tarımı. hayrabolutb.org.tr/media/ziraat/Bugday-Tarimi.pdf/ (Erişim tarihi: 13.12.2013)

Şevik S, Aktaş M, Doğan H & Koçak S (2013). Mushroom drying with solar asssisted heat pump system. *Energy Conversion and Management* **72**: 171-178

Şevik S, Aktaş M, Özdemir M B & Doğan H (2014). Güneş destekli ısı pompalı bir kurutucuda mantarın kuruma davranışlarının yapay sinir ağı kullanılarak modellenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi-Journal of Agricultural Sciences* **20**: 187-202

TMO (2013). Türkiye'de ekmek israfı araştırması. *Toprak Mahsulleri Ofisi Dergisi* **2**: 10-99

Trilliant-Berdal V, Souyri B & Fraise G (2006). Experimental study of ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors. *Energy Buildings* **38**: 1477–1484