

# Güneş Enerjisi ve Isı Pompası Destekli Isıtma-Kurutma Sisteminin Modellenmesi

Seyfi ŞEVİK<sup>1</sup>, Hikmet DOĞAN<sup>\*2</sup>, Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup>

\*G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

\*\* Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Ankara,

Geliş/Received : 05.08.2011, Kabul/Accepted : 12.10.2011

## ÖZET

Bu çalışmada, ısı pompası ve güneş enerjisi destekli ısıtma ve kurutma prosesi modellenmiştir. Bu sistem tasarımında enerji ihtiyacı güneş enerjisi ve ısı pompası ile sağlanmıştır. Daha az enerji girdisi ile ve daha kaliteli olarak kurutulmuş ürün, oransal-integral-türevsel (PID) kontrol tasarımı kullanılarak sağlanabilecektir. Bu sistem dizaynının enerji analizi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, Isı pompası, Enerji, Isıtma, Kurutma.

## Modeling of Heating-Drying System Assisted Solar Energy and Heat Pump

### ABSTRACT

In this study, heating and drying process assisted heat pump and solar energy was modeled. In this system designing, energy requirements were supplied by solar energy and heat pump. Less energy input and more quality dried product can be provided by using proportional integral derivation (PID) control designing. Energy analysis of this system designing was made.

**Key Words:** Solar energy, Heat pump, Energy, Heating, Drying.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, enerjinin verimli kullanılması konusunun gün geçtikçe önem kazanması ile enerji arz güvenliği ve sürdürülebilirliğinin sağlanması için geleneksel enerji kaynakları olan fosil yakıtların yerini temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları almaya başlamıştır. Dünya enerji talebinin yaklaşık yüzde 80'lik kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Buna paralel olarak enerjisini fosil yakıtlardan karşılayan Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığı % 80'e yaklaşmıştır. Bu bağlamda Türkiye enerji verimliliğine, yerli, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek dışa bağımlılığını azaltması en önemli konulardan birisidir. Enerjinin verimli kullanılabilmesi için bilgi ve teknolojiye yararlanılması gerekmektedir. Bu bilgi ve teknoloji sayesinde hayat daha yaşanılabilir ve gelecek nesillere de iyi bir yaşam ortamı sağlanabilir.

Türkiye'de enerjinin yaklaşık % 30'u, toplam elektrik tüketiminin ise yaklaşık % 40'ı binalarda kullanılmaktadır. Toplam enerji tüketiminin üçte birinden daha fazlası binaların ısıtılması, soğutulması ve aydınlatılması için harcanmaktadır. Hane halkları da toplam enerji tüketiminin % 60'ını ısıtma için harcamaktadır. Türkiye'de binaların yıllık enerji maliyeti 14 milyar dolar'ı aşmaktadır. Türkiye'de yaklaşık 18 milyon konut olduğu ve büyük kısmında yalıtımın yetersiz olması sebebiyle konutlarda ısıtma için harcanan enerji miktarı oldukça fazladır.

2009 yılında Türkiye'de tahıl ürünlerinde 33.6 milyon ton, sebzelerde 26.8 milyon ton ve meyvelerde 16.6 milyon ton üretim gerçekleşmiştir. Türkiye, kurutulmuş sebze konusunda ihracatçı bir ülke konumundadır. Dünyada ticareti yapılan kurutulmuş sebzelerin % 97-98'i kontrollü şartlarda sıcak hava ile kurutulmaktadır. Isıtma veya kurutma yapılacak mahalde uygun bir sıcaklık elde edebilmek için belli bir miktarda enerji gereklidir. Gerekli enerji; genelde elektrik, fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilir. Kurutma sistemlerinde tüketilen enerji miktarı göz önüne alındığında, günümüzde enerjinin kısıtlı ve pahalı olmasından dolayı araştırmacılar daha az enerji girdisi olan sistemler yapabilmek için çeşitli yöntemlere başvurmuştur. Bu yöntemlerden bir tanesi de güneş destekli ısı pompası sistemlerinin (GDIP) kullanılmasıdır. GDIP sisteminin kurutma şartlarını (sıcaklık, bağıl nem ve hız) sağlamasıyla kurutma esnasında harcanan enerji miktarı düşmektedir. Bu çalışmada, enerji verimliliği dikkate alınarak güneş enerjisi ve ısı pompası destekli bir sistem tasarımı ve tasarımın enerji analizi yapılmıştır.

### 2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Güneş enerjisi ve ısı pompası sistemlerinin tekil olarak kullanılması yerine birlikte kullanılması ile sistem performans katsayısının artması nedeniyle bu tür sistemler performans arttırmak amacı ile kullanılmaktadır. Güneş kolektöründe ısıtılan suyun ısı pompasının ısı kaynağı olarak kullanıldığı tipik güneş destekli ısı pompası (GDIP) ve güneş kolektörünün ısı pompasının buharlaştırıcısı olarak kullanıldığı direkt genişlemeli ısı

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: hdogan@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2011.14.1. 85-91

pompası (D-GDIP) olmak üzere iki tasarım şekli mevcuttur. Literatürde çalışmalar, GDIP yerine ilk olarak 1955 yılında Batı Virginia'da Sporn ve Ambrose [1] tarafından ortaya konmuş olan D-GDIP sistem tasarımlarının geliştirilmesi yönünde yoğunlaşmıştır. Ayrıca, GDIP konusunda da pek çok çalışma mevcuttur. Tarafımızdan hazırlanan modellemede de GDIP sistemi tasarıma uyarlanmıştır.

Çomaklı ve ark. (1992), Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde evsel ısıtma için enerji depolu GDIP sisteminin performansını incelemiştir. Kolektör verimi, ısı pompası performans katsayısı (COP), sistem COP'u ve depolama veriminin aritmetik ortalama değerleri, sırasıyla % 70, % 4.5, % 4 ve % 60 olarak bulunmuştur [2]. Kurun (1994) çalışmasında, GDIP ısıtma sistemi ile elde edilecek sıcaklık seviyesinin yaklaşık 50 °C civarında olduğunu, klasik radyatörlü ısıtmaya uygun olmadığını ancak yerden ısıtma sistemi için ideal olduğunu belirtmiştir [3]. Best ve ark. (1996), pirinç kurutma için GDIP kurutucusu performansını araştırmış ve kurutucunun COP değeri 5,3 olarak bildirilmiştir [4]. Achariyaviriya ve ark. (2000), ısı pompalı kurutucuda papaya ürününü 50 °C'de % 40.4 (kuru baz) nem değerinden % 23.2 (kuru baz) nem değerine kadar kurutmuşlardır. Maksimum özgül nem çekme oranı (SMER) 0.091 kg/kWh olarak hesaplanmıştır [5]. Kaygusuz (2000), seri bağlı güneş kolektörleri ile, enerji depolu ısı pompası sistemlerinin Karadeniz Bölgesi'ndeki konutların ısıtılması için önerilebileceği sonucuna varmıştır [6].

Özgener ve Hepbaşlı (2005), güneş enerjisi destekli düşey toprak kaynaklı ısı pompası (GDTKIP) ile sera ısıtmasında TKIP'nin ve hibrid sistemin; 10.93 °C referans sıcaklığında, ekserji verimini sırasıyla; % 71.8 ve % 67.7 olarak elde etmiştir. TKIP'nin modellenmesi ve COP'lerinin değerlendirilmesinde, dikey ve yatay tip TKIP'nin COP değerleri sırasıyla; 3.64 ve 3.12 olarak bulunmuştur. Güneş enerjisi ile birlikte çalışan dikey ve yatay tip TKIP'nin COP değeri ise 3.43 ve 2.72'dir [7]. Aktaş ve ark. (2005), ısı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellemesini yapmışlardır. Yapılan modelleme ile güneşli günlerde güneş enerjisinden faydalanılarak daha az enerji sarfiyatı olurken, diğer zamanlarda kurutma işleminin devamlılığının ısı pompası yardımı ile sağlanabileceğini belirtmişlerdir [8]. Ceylan ve ark. (2009), ısı pompalı bir kurutma fırınında elma kurutmuşlardır [9]. Aktaş ve ark. (2009), güneş enerjili kurutucu ve ısı pompalı kurutucuda elma kurutarak kuruma karakteristiklerini belirlemişlerdir [10]. Hawlader ve Jahangeer (2006), GDIP kurutucusunun ve su ısıtıcısının performansı araştırmak için bir benzetim programı geliştirmişlerdir. Yükün 20 kg ve kompresör hızının 1200 rpm olması durumunda özgül nem çekme oranı (SMER) değeri 0.65 olarak saptanmıştır. Çalışmada, kompresör hızı arttığında SMER ve COP değerinin azaldığı gözlemlenmiştir [11]. Gündüz (2007), Bilecik'te GDIP sistemi ile bir dairenin ısıtılması için zeminden ısıtmalı sistem kurmuştur. Isı pompası sisteminin, Bilecik için 7 aylık süre boyunca verimli bir şekilde

çalışabilmesi için Ocak-Mart, Kasım ve Aralık ayları için ek ısıtıcıya ihtiyaç duyacağı belirlenmiştir. COP<sub>IP</sub> değeri 3.1'dir [12]. Trillat-Berdal ve ark. (2007), tarafından yapılan jeotermal enerji ve GDIP'nin birlikte kullanıldığı sistem ile sıcak su ve ısıtma-soğutma gibi binanın enerji ihtiyacı karşılanmıştır. 11 ay sonunda, jeotermal enerji gücünden 39.5 W/m ve 40.3 W/m ortalama güç değerleri elde edilmiştir. Isıtma modunda COP<sub>IP</sub> değeri ortalama 3.75 bulunmuştur [13]. Dikici ve Akbulut (2008) tarafından, düzlemsel kolektörlü GDIP sistemi evsel ısıtmada kullanılabilirliği araştırılmıştır. Isıtma sezonunda, sistemin COP'si 3.08 olarak bulunmuştur [14]. Han ve ark. (2008), GDTKIP ısıtma sistemi ile gizli ısı depolama tankı (GIDT) araştırılmış ve sistemin matematiksel modeli geliştirilmiştir. Isıtma periyodunda sistemin COP değeri 3.28 ve en yüksek COP değeri 5.95 olmuştur. [15]. Bakırcı ve ark. (2009) tarafından, ısıtma amaçlı GDIP sisteminin analizi için, ısıtma sezonunda ısı pompasının ve tüm sistemin ortalama performans katsayıları sırasıyla 4.2 ve 3.6, ekserji verimleri ise ortalama % 44.3 ve % 6.8 olarak bulunmuştur [16].

### 3. ISITMA ve KURUTMA SİSTEMİ (HEATING AND DRYING SYSTEM)

Isıtma işlemlerinde; havanın sıcaklığı, havanın hızı, mahalın kullanım amacı gibi faktörler önemlidir. Isıtılmak istenen mahal eğer bir konut ise ortama verilen ısı ortamdaki ısı kayıplarını karşılamak zorundadır. Türkiye'de toplam enerji tüketiminin yaklaşık üçte biri binaların ısıtılmasında kullanılmaktadır. Enerji tasarrufu düşünülerek yapılan binalarda, özellikle ekonomik ısıtma sistemlerinin kullanılması ile binaların enerji tüketimi belirgin ölçüde azaltılabilir. Güneş enerjisi veya ısı pompası sistemlerinin ayrı ayrı veya birlikte kullanılmalarıyla, mevcut enerji kaynaklarının tüketimine ve çevrenin korunmasına önemli katkılar sağlanabilir. Mahal ısıtmasında güneş enerjisi veya GDIP sistemlerinin kullanılması durumunda yüksek bir enerji tasarruf potansiyeli bulunmaktadır. Son yıllarda GDIP sistemleri sıcak su üretmek için ısıtma amacıyla kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmış ve piyasada bazı uygulama örnekleri mevcuttur.

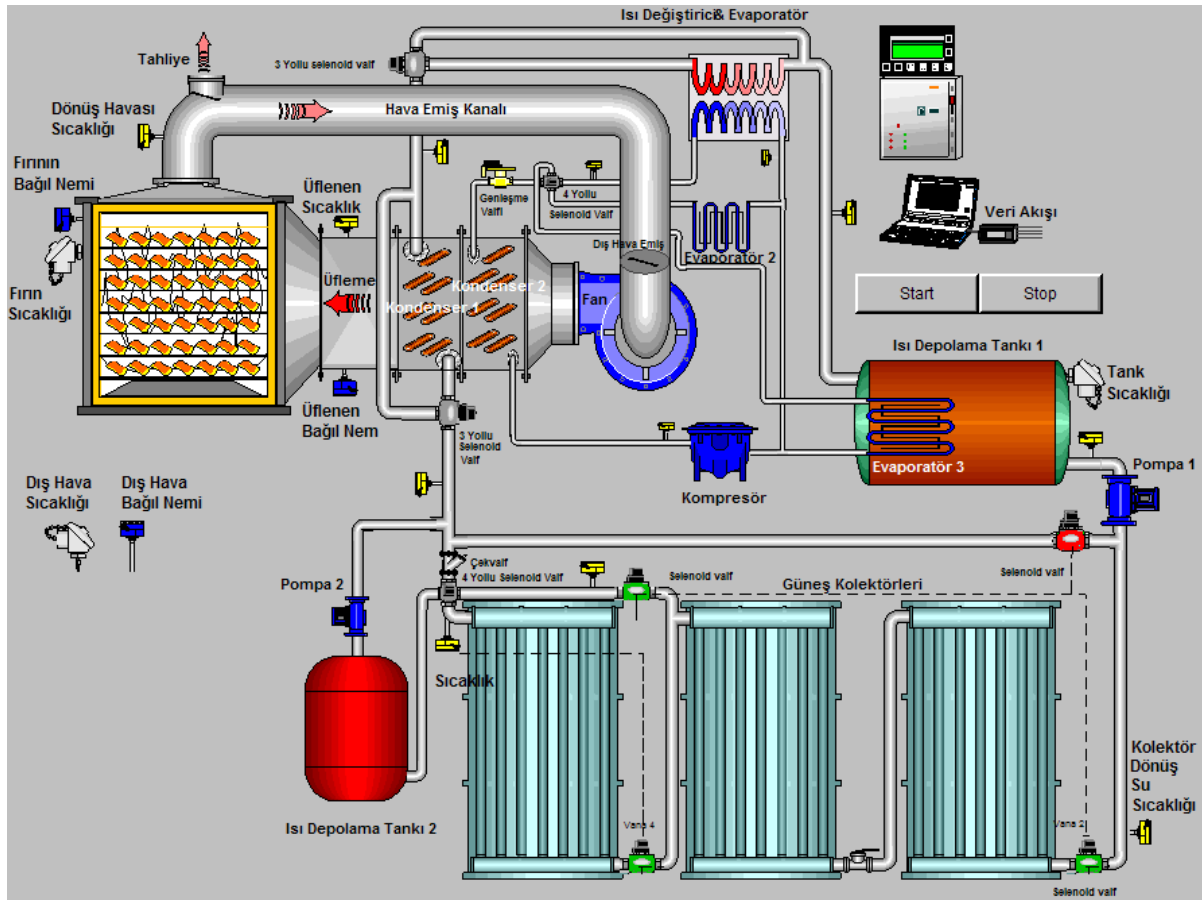
Bu çalışmada, düşük enerji tüketimi ile ısıtma ve kurutma amaçlı sıcak hava üretimi ve sıcak su üretimi yapabilen GDIP su ısıtıcısı sistemi tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada üretilen havanın sıcaklık kontrolü yapılmaktadır. Bu çalışmada amaç, güneş enerjisini kullanarak ısı enerjisi üretmek aynı zamanda da elde edilen bu enerjinin depolanmasını, sonrasında ise mahal ısıtması, ürün kurutması ve sera ısıtması gibi farklı alanlarda kullanılmasını sağlamaktır. Tasarım, ısı pompası ve güneş kolektörleri birbirinden ayrı iki kapalı sistem halinde düzenlenmiştir. Güneş kolektöründe ısıtılan su ısı pompasının ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla, ısı pompası için gerekli olan ısı kaynağının sıcaklığı artırılmıştır. Böylece, hava kaynaklı ısı pompası sistemlerindeki yoğunlaştırıcılardan atmosfere atılan ısı, çalışmada değerlendirilmeye alınmıştır.

İklimle bağı kalmadan, insan karar faktörünü en aza indirerek veya devre dışı bırakarak bütün yıl boyunca ekonomik olarak ısıtma ve/veya ürün kurutulmasına imkân sağlayan bir sistem tasarlanmıştır. Ancak sistemin hangi amaca hizmet edeceği önceden belirlenmelidir. Çünkü ısıtma veya kurutma için sistemde küçük değişiklikler yapılabilir. Sistem, hazırlanan bir bilgisayar programı yardımıyla farklı senaryolar eşliğinde PLC (programlanabilir lojik kontrol) veya PID kontrollü olarak ortam sıcaklığı, nem oranı, ürün ağırlığı vb değerlerin izlenip uygun şartlar oluşturularak verim artışı ve kaliteli ürün almayı olanaklı kılacak şekilde modellenmiştir. Tasarlanan ve analizi yapılan sistemde güneş enerjisi ve ısı pompası gibi iki farklı sistemden faydalanılarak ısı üretilmesi ile enerji tasarrufu sağlanabileceği düşünülmektedir.

Şekil 1'de tasarım modeli verilen sistem farklı fonksiyonlarda çalışabilme yeteneğine sahiptir. Modelde bulunan iki sistemin ayrı ayrı veya birlikte kullanılabilmesine olanak sağlanmıştır. Sistemde, güneş enerjisinden elde edilen ısının yetersiz olması durumunda ısı pompası devreye girecek, yeterli olması halinde devreden çıkacaktır. Güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisi, invertörlü olan ve sıcaklığa göre hız

sistemin normal çalışma kurallarına uygun olarak kullanılmak üzere, diğer 2 buharlaştırıcı ise ilk buharlaştırıcının iş yapmadığı durumlarda devreye girerek, dış ortamdan veya ısı depolama tankından ısı çekerek, sisteme devamlılık sağlanması amacıyla kullanılmaktadır.

Sistemde enerji üretimi; seri olarak bağlanan 3 adet güneş kolektöründen veya ısı pompasından sağlanmaktadır. Güneş enerjisi devresinde akışkanın devir daimi, dolaşım pompasıyla gerçekleştirilir. Bu sayede akışkan, güneşten aldığı ısı enerjisi ihtiyacı yerine veya enerji deposuna bırakarak tekrar güneş kolektörlerine döner. Güneş kolektöründen gelen sıcak çalışma akışkanı kullanım yerinde kullanılır, ısı ihtiyacı olmadığı durumlarda ise ısı depolama tankına yönlendirilir. Isı depolama tankı içerisinde bulunan serpantinden geçerken enerjisini bırakır. Depodan çıkan düşük enerjili çalışma akışkanı, pompa yardımıyla güneş kolektörüne pompalanarak sistemde dolaşımı sağlanır. Tank içerisindeki ısı depolama akışkanı olarak su kullanılmaktadır. Ancak yüksek ısı depolama kapasitesine sahip endüstri yağının da performans deneyleri yapılarak ısı depolama akışkanı olarak kullanılabilir.



Şekil 1. GDIP sisteminin tasarım modeli.

kontrolü yapılabilen bir fan yardımıyla mahale verilmektedir. Isı pompası sistemi, ısı gereksinimine göre hareket eden bir devri ayarlanabilen bir kompresör ve 2 adet ilave buharlaştırıcıya sahiptir. Birinci buharlaştırıcı

Tamamen taze hava ile çalışan sistemlerde kurutma havası ürün üzerinden geçirildikten sonra egzozdan atıldığından bu tür sistemlerde enerji tüketimi çok

fazla olmaktadır. Tarafımızdan modellenen sistemde havanın izlediği yol; güneş kolektörlerinden gelen ısı, ihtiyaca göre ya sadece hat üzerindeki serpantin üzerinden ya da ısı pompasının da devreye girmesiyle yoğunlaştırıcı ve serpantin üzerinden bir fan vasıtasıyla mahal içerisine doğru olmaktadır. Sisteme gerektiğinde bir miktar taze hava alınabilir.

Birçok uygulamada, havanın kurutma sisteminde yeniden dolaştırılması ısı verimi artırır. Fazla dolaşım ile oluşan düşük ısı kaybıyla, az dolaşım ile oluşan yüksek kuruma hızı, dolaştırılan hava oranı en uygun duruma getirilerek giderilebilir. Kurutma havasının nem içeriği, yeniden çevrimden etkilendiği için, istenilen hava neminin korunması amacıyla zaman zaman analiz edilmelidir [17].

İsı depolama; kullanılan toplayıcı miktarına, yani toplam kolektör alanına göre tayin edilen ve toplayıcılardan elde edilen sıcak suyun toplandığı kaptadır. Güneş enerjili sıcak su sisteminde, genellikle toplayıcıya göre  $1\text{m}^2$  toplayıcı yüzey alanı için 70-100 litre hacminde bir tank seçilir. Havanın uzun süre kapalı olabileceği veya uzun süre soğuk olabileceği ve gece kullanılabilmesi gibi durumlar gözetilerek depo hacmi daha büyük seçilebilir.

Kontrol işlevi; PID kontrolü, devri ayarlanabilen fan, devri ayarlanabilen kompresör, veri kaydedici, selenoid valfler, invertör, higrostat, sistemin yönlendirilmesinde kullanılan ölçü aletleri ile senkronize çalışan kontrol kartları, yazılım ve benzeri sistem ve sistem elemanlarının birlikte birbiriyle uyumlu kullanıldığı bir dizi elektro-mekanik kontrol elemanları tarafından yapılmaktadır.

#### 4. ENERJİ ANALİZİ (ENERGY ANALYSIS)

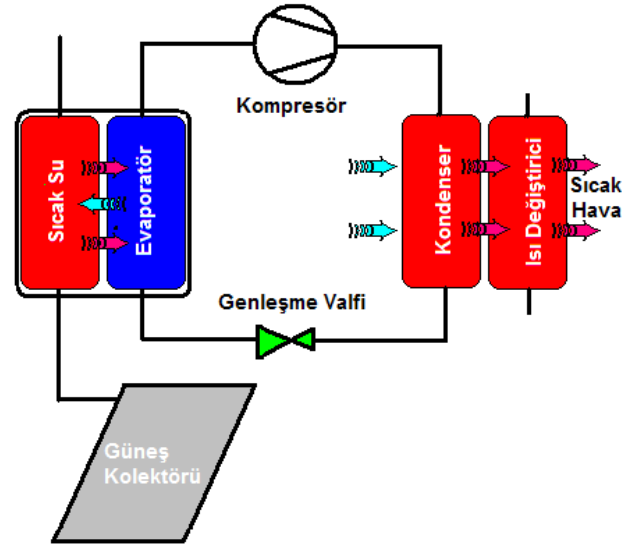
Termodinamiğin I. Kanunu enerjinin korunumu ilkesine göre; ısı pompasının enerji denklemi olarak buharlaştırıcıdan sisteme alınan ısı ( $Q_{\text{Buh}}$ ) ile kompresörde harcanan enerji ( $W_{\text{komp}}$ ) toplamı yoğunlaştırıcıdan kurutma havasına atılan ısıya ( $Q_{\text{Yoğ}}$ ) eşittir. Bu nedenle yoğunlaştırıcıdan havaya aktarılan ısı;

$$Q_{\text{Yoğ}} = Q_{\text{Buh}} + Q_{\text{Komp}} \quad (1)$$

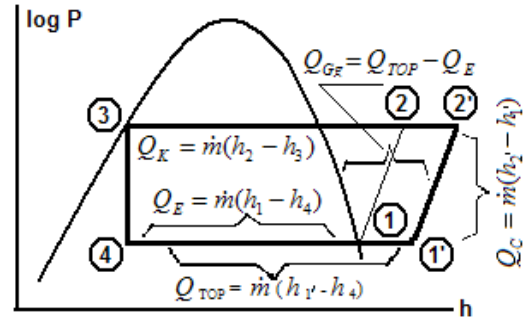
şeklinde ifade edilir.

Şekil 2’de GDIP sistemi ve Şekil 3’de de ısı pompası sisteminin logP-h diyagramı görülmektedir.

Gerekli toplam ısı miktarını ısı pompası yoğunlaştırıcı ünitesi ve güneş enerjisi kolektörlerinden gelen sıcak su hattı üzerindeki ısı değiştiricisi sağlamaktadır. Şekil 2’de sistemde enerji akışı gösterilmektedir. Burada, ısı çekiminde kolektör çıkış sıcaklığı  $20\text{-}25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile sınırlıdır. Şekil 3’de ise, IP çevriminin logP-h diyagramı verilmiştir. Bu diyagram kullanılarak gerekli buharlaştırıcı, yoğunlaştırıcı ve kompresör kapasiteleri hesaplanabilir. Kullanılan soğutucu akışkanın log P-h diyagramında;  $(h_1-h_2)$  kompresör giriş çıkışını,  $(h_2-h_3)$  yoğunlaştırıcı giriş çıkışını,  $(h_3-h_4)$  ise kılcal boru giriş çıkışını ifade eder. Tasarlanan sistem ile diyagram farklılaştırılmıştır. Buna



Şekil 2. Sistemde enerji akışı.



Şekil 3. Isı pompası sisteminin Log P-h diyagramı.

göre çevrim 1'-2'-3-4 şeklini almıştır. Sistemde kullanılacak soğutucu akışkan debisi;

$$\dot{Q}_K = \dot{m}(h_2' - h_3) \quad (2)$$

eşitliği ile hesaplanır. Yoğuşturucunun ısıtma veya kurutma havasına verdiği ısı;

$$Q_{\text{ve}} = Q_k \cdot S_h \quad (3)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır. Isı pompası çalışma süresi ( $S_h$ ) ile sistem çalışma süresi farklı olacaktır. Çünkü sistemde gerekli ısının sağlanması neticesinde ısı pompası çalışmayacaktır. Isı pompası sisteminde kompresör gücü;

$$\dot{Q}_C = \dot{m}(h_2' - h_1') \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanır. Sistemde buharlaştırıcı kapasitesi ise;

$$\dot{Q}_E = \dot{m}(h_1' - h_4) \quad (5)$$

eşitliği ile hesaplanır. Mahalin yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı TS 825’de verilen hesap metoduyla  $\text{kWh/m}^3$  olarak hesaplanır. Mahal ısıtması için gerekli olan toplam ısı miktarı;

$$Q_{VTOP} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (6)$$

Kurutma için gerekli olan toplam ısı miktarı;

$$Q_{VTOP} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad (7)$$

olarak harcanan veya kaybolan ısıların toplanması ile bulunur. Mahal veya fırın duvarlarının ısıtılması için gerekli enerji:

$$q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot \Delta T \quad (8)$$

Üflenlen havanın ısıtılması için gerekli enerji:

$$q_2 = v \cdot c_2 \cdot \rho \cdot \Delta T \quad (9)$$

Mahalden veya fırından çevre havasına olan kayıpları karşılamak için harcanan enerji:

$$q_3 = K \cdot A \cdot \left[ \frac{(T_k + T_{iç})}{2} - T_d \right] Z \quad (10)$$

(10) nolu eşitlikteki ısı geçirgenlik katsayısı:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{1}{\alpha_{dış}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (11)$$

Fırın içerisindeki ürünlerin ısıtılması için gerekli enerji:

$$q_4 = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T_k \quad (12)$$

Üründeki nemin buharlaştırılması için gerekli enerji:

$$q_5 = S_a \cdot q_{5a} \quad (13)$$

kg başına verilen ısı;

$$q_{5a} = [h_{ss}'' - h_s'] \quad (14)$$

eşitliği ile bulunur [8].  $SMER_{sd}$  üründen 1kg su çekebilmek için güneşli kurutucuda kullanılan enerjiyi tanımlar ve aşağıdaki eşitlik ile tarif edilir;

$$SMER_{sd} = \frac{\dot{m}_{sd}}{\dot{W}_F} \quad (15)$$

Isı pompası sistemindeki buharlaştırıcı, güneş kolektöründen gelen sıcak su hattı üzerindeki ikinci ısı değiştiricisinden ısı çekmektedir. Bu şekilde tasarlanması ile sisteme fazladan bir enerji kazandırılmaktadır. Güneş kolektöründen ısı sağlanmasıyla buharlaştırıcının çektiği toplam ısı;

$$\dot{Q}_{TOP} = \dot{m} (h_{1'} - h_4) \quad (16)$$

eşitliği ile bulunur. Sistemdeki birinci ısı değiştiricisinden kazanılan enerji:

$$\dot{Q}_{ID} = \dot{m} (h_g - h_{ç}) \quad (17)$$

eşitliği ile hesaplanır. Birinci ısı değiştiricisinin ısıtma veya kurutma havasına verdiği ısı;

$$Q_{IDve} = Q_k \cdot F_h \quad (18)$$

Sistemin güneş kolektöründen (Gg) fazladan kazandığı enerji;

$$Q_{Gg} = Q_{TOP} + Q_E \quad (19)$$

eşitliğinden yararlanılır. Sistemde havanın kazandığı enerji:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (20)$$

ile bulunur. Isı pompası sisteminin güneş kolektörü destekli buharlaştırıcının ( $G_{ke}$ ) verimi için;

$$\eta_{KV} = \frac{Q_{Gg}}{I_{TOP}} \cdot 100 \quad (21)$$

eşitliğinden faydalanılır. Bunun için kolektör yüzeyine gelen enerji ( $I_{top}$ ) ya karmaşık formüllerle hesaplanır ya da bir solarimetre ile anlık olarak takip edilebilir.

Bir kolektörün topladığı faydalı enerji:

$$Q_f = A_t \cdot I_e \cdot \eta_t \quad (22)$$

eşitliği ile hesaplanır. Anlık toplayıcı verimi:

$$\eta_t = F_t \cdot \left[ (\tau\alpha)_e - K \cdot \frac{T_{ig} - T_{ç}}{I_e} \right] \quad (23)$$

ifadesiyle bulunabilmektedir. Eşitlikte yerine yazılırsa;

$$Q_f = A_t \cdot [F_t \cdot (\tau\alpha)_e \cdot I_e - F_t \cdot K \cdot (T_{ig} - T_{ç})] \quad (24)$$

ifadesi elde edilir. Isı depolama tankındaki suyu ısıtmak için gerekli enerji;

$$Q = m \cdot c_{su} \cdot \Delta T \quad (25)$$

ifadesiyle bulunabilir. Isı depolama tankının enerji balansı ise;

$$(\rho \cdot cp \cdot V_{st}) \frac{dT_{st}}{dt} = q_s - q_{Ls} - q_{stl} \quad (26)$$

formülüyle hesaplanır. Bu formül için yardımcı eşitlikler ise;

$$q_{Ls} = m_L \cdot cp \cdot \Delta T \quad (27)$$

$$q_{stl} = U_{st} \cdot A_{st} \cdot \Delta T \quad (28)$$

$$A_{st} = 1,845 (2 + h/D) V_{st}^{2/3} \quad (29)$$

ile ifade edilir. Sirkülasyon pompasının enerji analizi;

$$W_p = m_p \cdot (h_{ç} - h_g) \quad (30)$$

ile hesaplanır. Isı pompasının etkinlik katsayısı;

$$COP_{IP} = \frac{Q_{Kond}}{W_{Komp}} \quad (31)$$

yardımıyla elde edilir. Tüm sistemin etkinlik katsayısı ise;

$$COP_{sist} = \frac{Q_{sist}}{W_{sist}} = \frac{Q_{Kond} + Q_{ID}}{W_{Komp} + W_{Fan} + W_{pomp}} \quad (32)$$

eşitliğinden yararlanılarak elde edilir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULT AND SUGGESTIONS)

Enerji verimliliğinin son derece önemli olduğu günümüzde yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi ve bir ısı kaynağı olarak verimli olarak çalıştırılabilen ısı pompası sistemi birlikte düşünülüp bir sıcak hava üretim ve kurutma sistemi tasarlanmıştır. Buna ek olarak, enerji giderleri az olan ve verimli bir şekilde çalışacak olan bu ısı enerjisi üretim sisteminin enerji analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada, GDIP ile bir alanın ısıtma ve bir kurutma fırınının kurutma ısı ihtiyacını karşılayan bir sistem tasarımı üzerine hazırlanmış model çalışma incelenmiştir. Modeli oluşturulan GDIP'nin ısıtma ve kurutma amaçlı kullanılmasının Türkiye şartlarında verimli ve kullanılabilir olduğunun başarılı sonuçlarla desteklenmesi sonucunda bu tür çalışmalar sektörde uygulamaya konulabilir.

Oluşturulan bu model, sera ısıtmasında kullanılabilirliği gibi havalandırma ve iklimlendirme sistemlerine de entegre edilerek çalıştırılabilir ve uygulanacak sistem ile enerji giderleri azaltılabilir.

### SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

$A$	Toplam mahal veya fırın duvar yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
$c_1$	Duvar malzemelerinin özgül ısısı (kJ/kg K)
$c_2$	Havanın özgül ısısı (kJ/kg K)
$d$	Duvarları oluşturan her bir katmanın kalınlığı (m)
$S_h$	Sistem çalışma süresi (saat)
$h$	Soğutucu akışkanın entalpisi (kJ/kg)
$h'_s$	Suyun ısı miktarı (Entalpi) (kJ/kg)
$h''_{ss}$	Suyun doymuş buhar halindeyken ısı miktarı (Entalpi) (kJ/kg)
$K$	Isı geçirgenlik katsayısı (W/m <sup>2</sup> K)
$\dot{m}$	Soğutucu akışkan debisi (kg/s)
$m_1$	Duvar malzemelerinin toplam kütlesi (kg)
$m_f$	Kurutulacak ürünün kütlesi (kg)
$c_f$	Kurutulacak ürünün özgül ısısı (kJ/kgK)
$q_1$	Duvarların ısıtılması için gerekli enerji miktarı (kJ)
$q_2$	Üflenen havanın ısıtılması için gerekli enerji miktarı (kJ)
$q_3$	Mahalden veya fırından çevre havasına olan ısı kayıpları (kJ),
$q_4$	Fırın içindeki ürünlerin ısıtılması için gerekli enerji (kJ)

$q_5$  Üründeki nemin buharlaştırılması için gerekli enerji (kJ)

$q_{5a}$  Ürün içerisindeki suyun buharlaştırılması için kg başına verilmesi gerekli enerji (kJ/kg)

$S_a$  Ürün içerisindeki toplam su miktarı (kg)

$SMER_{sd}$  1 kg su kaldırmak için güneşli kurutucuda kullanılan enerji (kg/kWh)

$Q_{vTOP}$  Kurutma için gerekli toplam enerji miktarı (kJ)

$Q_{Gg}$  Sistemin güneş kolektöründen fazladan kazandığı enerji (kJ)

$\dot{Q}_K$  Yoğuşturucu gücü (kW)

$\dot{Q}_{ID}$  Isı değiştiricisi gücü (kW)

$Q_{IDve}$  Isı değiştiricisinin ısıtma veya kurutma havasına verdiği ısı (kJ)

$\dot{Q}_C$  Kompresör gücü (kW)

$\dot{Q}_E$  Buharlaştırıcı gücü (kW)

$Q_{ve}$  Yoğuşturucunun ısıtma veya kurutma havasına verdiği ısı (kJ)

$Q_{TOP}$  Güneş kolektöründen ısı sağlanmasıyla buharlaştırıcının çektiği toplam ısı (kJ)

$\eta_{KV}$  Isı pompası sisteminin güneş kolektörü destekli buharlaştırıcının verimi

$t_k$  Kurutma fırınının işletme sıcaklığı (°C)

$t_{iç}$  Kurutmaya başlamadan önceki iç hava sıcaklığı (°C)

$t_d$  Dış hava sıcaklığı (°C)

$v$  Fırın hacmi içerisindeki toplam hava miktarı (m<sup>3</sup>)

$\alpha_{iç}$  İç yüzey ısı taşınım katsayısı (W/m<sup>2</sup>K)

$\alpha_{dış}$  Dış yüzey ısı taşınım katsayısı (W/m<sup>2</sup>K)

$\lambda$  Duvarları oluşturan her bir katmanın ısı iletim katsayısı (W/mK)

$\Delta T_k$  Fırın işletme sıcaklığı ile ürün sıcaklığı arasındaki fark (°C)

$\Delta T$  Fırın işletme sıcaklığı ile iç ortam sıcaklığı arasındaki fark (°C)

$\rho$  Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)

$Z$  Isıtma süresi (saat)

$A_t$  Kolektör yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

$I_e$  Birim eğik yüzeye düşen anlık ışınım gücü (W/m<sup>2</sup>)

$\eta_t$  Anlık kolektör verimi

$F_t$  Kolektör ısı kazancı faktörü

$(\tau\alpha)_e$  Efektif yutma katsayısı

$T_{tg}$  Suyun kolektöre giriş sıcaklığı (°C).

$T_{iç}$  Çevre sıcaklığı (°C).

$m$  Kütle (g)

- $V_{st}$  Depolama tankı hacmi ( $m^3$ )  
 $q_s$  Yararlı güneş ısı yükü (W)  
 $q_{is}$  Güneş enerjisi tarafından toplanan yük (W)  
 $q_{stl}$  Depolama tankının ısı kaybı yükü (W)  
 $A_{st}$  Isı depolama tankının yüzey alanı ( $m^2$ )  
 $U_{st}$  Tankın ısı kaybı yükü katsayısı ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )  
 $D$  Tank çapı (m)  
 $h$  Tank yüksekliği (m)  
 $W_{Fan}$  Fan gücü (kW)

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- 1) Sporn, P., Ambrose, E.R., "The heat pump and solar energy", In: *Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy*, Phoenix, Ariz, November 1-5, 1955.
- 2) Çomaklı, Ö., Kaygusuz, K., Ayhan, T., "Solar-assisted heat pump and energy storage for residential heating", *Solar Energy*, 51 (5): 357-366, 1992.
- 3) Kurun, E., "Güneş toplacından faydalanmanın bilgisayarla hesabı", Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 84 s., 1994.
- 4) Best, R., Cruz, J.M., Gutierrez, J., Soto, W., "Experimental results of a solar assisted heat pump rice drying system", *Renew Energy* 9:690-694, 1996.
- 5) Achariyaviriya, S., Sopanronnarit, S., Terdyothin A., "Mathematical model development and simulation of heat pump fruit dryer", *Drying Technology*, 18(1-2): 479-491, 2000.
- 6) Kaygusuz, K., "Experimental and theoretical investigation of a solar heating system with heat pump", *Renewable energy*, 21: 79-102, 2000.
- 7) Özgener, Ö., Hepbaşlı, A., "Performance Analysis of a Solar Assisted Ground Source Heat Pump System for Greenhouse Heating: an Experimental Study", *Building and Environment*, 40:1040-1050, 2005.
- 8) Aktaş, M., Ceylan İ., Doğan, H., "Isı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellenmesi", Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, *Politeknik Dergisi*, 8(4): 329-336, 2005.
- 9) Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan H., "Isı pompalı kurutma odasında elma kurutulması", *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 25(2): 9-14, 2005.
- 10) [Aktaş, M., Ceylan, İ., Yılmaz, S., "Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer", *Desalination*, 239:266-275, 2009.
- 11) Hawlader, M.N.A., Jahangeer, K. A., "Solar heat pump drying and water heating in the tropics", *Solar Energy*, 80(5): 492-499, 2006.
- 12) Gündüz, A.B., "Bilecik ilinde güneş enerjisi destekli ısı pompasıyla sıcak su üretiminin performansı", *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.
- 13) [Trillat-Berdal, V., Souyri, B., Achard, G., "Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors", *Applied Thermal Engineering*, 27:1750-1755, 2007.
- 14) Dikici, A., Akbulut, A., "Performance Characteristics and Energy-Exergy Analysis of Solar-Assisted Heat Pump System", *Building and Environment*, 43 (11), 1961-1972, 2008.
- 15) Han, Z., Zheng, M., Kong, F., Wang, F., Li, Z., Bai, T., "Numerical simulation of solar assisted ground-source heat pump heating system with latent heat energy storage in severely cold area", *Applied Thermal Engineering*, 28:1427-1436, 2008.
- 16) Bakırcı, K., Çomaklı, K., Özyurt, Ö., Yılmaz, M., "Güneş kaynaklı ısı pompasının enerji ve ekserji analizi", *Mühendis ve Makina*, cilt 50, sayı 590, 2009.
- 17) Günerkan, H., "Endüstriyel kurutma sistemleri", *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 36(13): 1-10, Mart-Nisan 2005.