

GAZ TAHRİKLİ ISI POMPALARININ KURUTMADA KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Ayşegül GÜNGÖR
Arif HEPBAŞLI
Hüseyin GÜNERHAN

ÖZET

Son yıllarda, araştırmacıların ve politikacıların yoğunlaştığı sorunların başında enerji gelmektedir. Fosil yakıtlar günümüzde en çok kullanılan enerji kaynağıdır. Ancak, buna rağmen, yeryüzündeki fosil yakıt rezervlerinin kısıtlılığı ve yakın gelecekte tamamen tükeneceğinin tahmin edilmesi, dünyamızın geleceğinde enerji kıtlığının çok da uzak olmadığını göstermektedir.

Kurutma yoğun enerji girdisine ihtiyaç duyan bir işlem olup, çoğu sanayileşmiş ülkede kurutmanın sanayide kullanılan enerjideki payı % 10-15 civarlarındadır. Bir ısı pompası ve bir kurutucunun birleşimi olan ısı pompalı kurutucu ise, işletilmesi için gerekli olan elektrik enerjisinden daha fazla ısı enerji sağlamaktadır. Enerji fiyatlarında artan eğilim nedeniyle, dünyadaki her endüstriyel sektörde verimli yöntemlerin kullanımına olan gereklilik büyük önem kazanmıştır. Bu çerçevede, alternatif sistemler arayışı içine girilmiştir.

Bir gaz motoru tahrikli ısı pompası (GMIP); açık tip bir kompresörün gaz motoru ile tahrik edildiği yeni tip bir ısı pompasından oluşmaktadır. GMIP sistemleri, özellikle ısı geri kazanımı (motor silindir ceketlerinden ve egzoz gazından ısı geri kazanımı) sayesinde yüksek enerji verimi ile çalışan, düşük enerji tüketiminden dolayı çevre ile uyumlu, gaz kaynağının ayarlanmasıyla kolaylıkla çalışma hızı ayarlanabilen, dış ortam sıcaklığından fazla etkilenmeyen, ekonomik sistemler olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, GMIP kurutma sisteminde 45 °C sıcaklıkta ve 1 m/s hava hızında, üç farklı tıbbi aromatik bitki (*Foeniculum vulgare*, *Malva sylvestris* L., *Thymus vulgaris*) kurutulmuştur. Enerji ve ekserji analiz yöntemleri kullanarak bazı termodinamik parametreler tüm sistem ve sistem bileşenleri için hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Gaz motoru tahrikli ısı pompası, Tıbbi aromatik bitki, Performans değerlendirme.

ABSTRACT

In recent years, one of the most important topics for investigators and politicians is energy issues. The main energy source in the world is fossil fuels and depletion of fossil fuels is a risk for energy poverty in the future.

On the other hand, drying is an energy-intensive process with the energy consumption value of 10-15% of the total energy consumption in all industries.

A heat pump drying system, which is a combination of a heat pump and a drier, provides much more thermal energy than electrical energy for the operation of the system. Due to the growing trend of energy prices, the use of efficient methods has gained big importance in the worldwide industrial sector. In this context, investigations have focused on alternative systems.

Gas engine driven heat pump (GEHP) systems are a new type of HP systems, which have an open compressor driven by an internal combustion engine. GEHP systems work with high energy efficiency because of heat recovery. They reduce environmental pollution with low fuel consumption and are an economic choice by using relatively cheaper energy sources. GEHP's compressor speed can easily be modulated by adjusting the gas supply, while GEHP systems are not effected by the ambient temperature. All these features cause growing interest in GEHP systems.

In this study, three medicinal and aromatic plants (*Foeniculum vulgare*, *Malva sylvestris* L. and *Thymus vulgaris*) were dried in a pilot scale GEHP drier at an air temperature of 45 °C with an air velocity of 1 m/s. Some thermodynamic parameters were calculated for main components of the system and overall drying system using energy and exergy analysis methods.

Key Words: Drying, Gas engine driven heat pump, Medicinal and aromatic plant, Performance evaluation.

1. GİRİŞ

Fosil yakıt rezervlerinin yakın gelecekte tükenmesi, araştırmacıları alternatif kaynaklara, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesine yol açmıştır. Fakat yüksek kurulum masraflarından dolayı alternatif enerji kaynakları yaygınlaşmamıştır. Araştırmaların odaklandığı bir diğer eksen ise var olan sistemlerin verimliliğinin yükseltilmesi ve bu yolla enerji tüketiminin düşürülmesidir. Bu şekilde hem enerji kaynaklarının tükenmesi gecikmekte, hem de çevreye verdikleri zarar azaltılmaktadır. Bu çalışmalar ile enerji masrafları azaltılabildiği gibi, geliştirilen sistemlerin kurulum masrafları da yüksek olmadığından uygulanabilirliği yüksektir. Tüm bu özellikleri ile sistem verimliliklerinin artırılmasına dönük çalışmalar sadece araştırmacıların değil aynı zamanda yatırımcıların da yoğun ilgisini çekmektedir [1].

Enerji tüketimi incelendiğinde ise, başta evsel tüketim olmak üzere enerjinin en yoğun tüketildiği alanlar su ve hava ısıtması/soğutması ile iklimlendirme olarak karşımıza çıkmaktadır. Endüstriyel uygulamalara baktığımızda ise özellikle kurutma, enerjinin yoğun tüketildiği bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Çoğu sanayileşmiş ülkede, kurutmada kullanılan enerjinin payı, ülkenin sanayide tükettiği enerjinin %7-15'i arasında olup, çoğunlukla ısı verimi %25 ile %50 arasında değişmektedir. Tahminlere göre, tarımsal ürünlerdeki toplam enerji ihtiyacının %60'ından fazlası kurutma işleminde kullanılmaktadır. Hem su ve hava ısıtması/soğutması ile iklimlendirme, hem de kurutma işlemlerinin uygulamaları incelendiğinde enerji kaynağı olarak fosil yakıtların veya fosil yakıtların tüketilmesiyle elde edilen elektriğin kullanıldığı görülmektedir. Dolayısıyla bu alanlardaki çalışmalar sistemlerdeki enerji verimliliğinin düşürülmesi açısından özellikle önemli hale gelmektedir. Bu alanların tamamında uygulamaları denenmiş ve başarı elde edilmiş olan ısı pompalarının (IP) önemi de burada ortaya çıkmaktadır [2]. Isı pompalarının (IP) önemi ise burada ortaya çıkmaktadır. Hem su-hava ısıtmasında, hem iklimlendirmede kullanılan ve enerji verimi yüksek olan IP sistemleri, düşük sıcaklık ortamından yüksek sıcaklık ortamına ısının transferini sağlayarak ısı üreten cihazlardır (Hepbaslı et al., 2009). Kullanılan IP'ları kullandığı enerji kaynağına göre elektrikli ısı pompaları (EIP), kimyasal IP'ları, toprak (yer) kaynaklı, su kaynaklı, hava kaynaklı IP'ları, jeotermal IP'ları, güneş enerjili IP'ları ve/veya hibrit güç kaynaklı IP'ları gibi çeşitli kategorilere ayrılır. Bunlardan bir tanesi de gaz motoru tahrikli ısı pompalarıdır (GMIP) [3,4].

GMIP, içten yanmalı bir motorla tahrik edilen, açık kompresörlü ve genellikle tersinir buhar-sıkıştırma çevrimli IP'ndan oluşmaktadır. Gaz motorunun ısı verimi düşük olmasına karşın (% 30-45), egzoz gazındaki atık ısının ve motor silindir ceketlerindeki atık ısının geri kazanımı ile toplam atık ısının yaklaşık % 80'inden faydalanılabilmekte ve bu da GMIP'ları verimli cihazlar haline getirmektedir [5,6]. Düşük fosil yakıt tüketiminden dolayı GMIP sistemleri doğayla barışık sistemlerdir. Aynı zamanda, doğal gaz, propan, LPG gibi ucuz enerji kaynaklarından faydalanıyor olması ve düşük işletim maliyetleri, bu sistemleri ekonomik hale getirmektedir. Diğer taraftan, GMIP'larının yaygınlaşması, elektrik tüketimini/ ihtiyacını dengeleyecek ve yaşanan elektrik piklerini hafifletecektir.

Kurutma işlemi enerjinin yoğun olarak kullanıldığı proseslerden biridir. Tahminler; odun ürünleri imalatında toplam enerjinin % 70'inden fazlasının, tekstil ürünleri imalatında toplam enerjinin % 50'sinin ve buğday, mısır gibi tarım ürünlerindeki toplam enerji ihtiyacının % 60'ından fazlasının kurutma prosesinde tüketildiğini göstermektedir. Bu değerler, yürütülecek olan enerji verimliliği çalışmalarının önemini açıkça göstermektedir [7].

Bundan dolayı özellikle kurutma işlemlerinde ekserji analizi uygulamaları ile karşılaşılmaktadır, ancak özgün bir alan olarak gıda kurutmasındaki çalışmalar sınırlı kalmıştır. Ekserji, enerjinin faydalılığının, kalitesinin bir ölçüsüdür ve bir maddenin çevreyle etkileşim potansiyelinin etkin bir ölçümüdür. Enerji analizi sadece ısı kayıplarını azaltmak veya ısı geri kazanımını arttırmak için kullanılırken, ekserji analizi ile işlemin ve işlem ekipmanlarının olası geliştirme olanakları ve sistem bileşenlerindeki tersinmezliklerin dağılımı hakkında bilgi edinilebilir. Böylece sistemdeki tersinmezlikler belirlenebilmekte, enerji kayıpları minimize edilebilmekte ve enerjinin daha verimli kullanımı sağlanabilmektedir [8].

Tıbbi aromatik bitkiler gıda, kozmetik ve ilaç sanayinde esans, ilaç ve baharat üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadırlar. Genellikle yüksek seviyede nem ve mikroorganizma içerirler. Kurutma ve depolama koşulları bu ürünlerin kalitesini korumak için çok önemlidir ve hasattan hemen sonra kurutulmaları gerekmektedir. Kekik (*T.vulgaris*), ebegümece (*M.sylvestris*) ve rezene (*F.vulgare*) bitkileri, Türkiye'de geleneksel gıda olarak kullanılan önemli tıbbi aromatik bitkilerdir. Bu bitkiler üzerinde yürütülmüş araştırmalar da bitkilerin yüksek antioksidan ve antimikrobiyal madde içerdiğini göstermiştir [9,10,11]. Gıda maddelerine uygulanan kurutmanın birçok amacı vardır ve bunların belki de en belirgin olanı, uzun süreli depolamalarda ürünün bozulmasını önlemektir. Kurutma işlemi uzun süreli depolamalarda ürünün bozulmadan kalmasını, ürünün nemini mikrobiyal gelişme veya diğer reaksiyonları sınırlamaya yeterli seviyeye düşürerek sağlar. Buna ek olarak ürünün nem miktarının düşürülmesi ile aroma ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin muhafazası da sağlanmaktadır. Kurutma işleminin diğer amacı ürün hacmini azaltarak, gıda maddesinin önemli bileşenlerinin taşınmasında ve depolanmasında verimliliği artırmaktır.

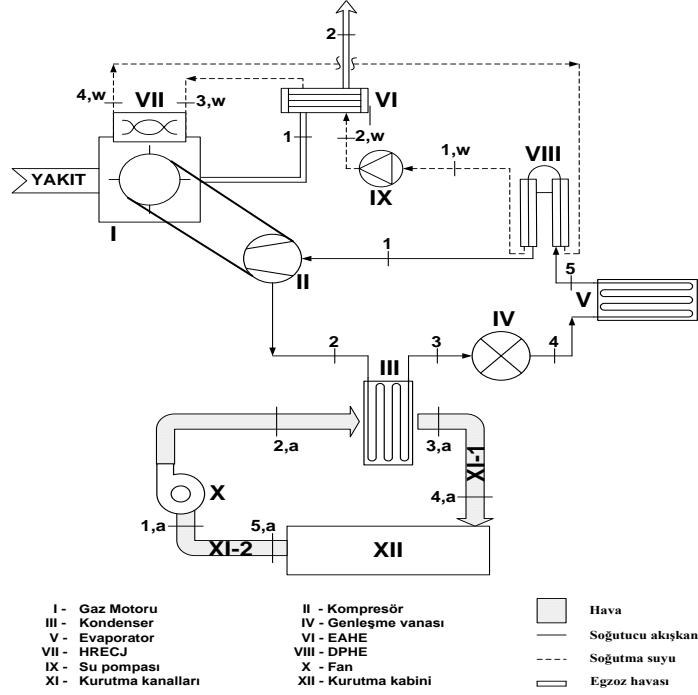
Bu çalışmada, ince tabaka kurutma prensibine dayanarak kekik (*T.vulgaris*), ebegümece (*M.sylvestris*) ve rezene (*F.vulgare*), tıbbi aromatik bitkileri GMIP kurutucu sisteminde kurutulmuş ve bitkilerin kuruma kinetiği incelenmiştir. Ayrıca enerji ve ekserji analiz yöntemi kullanılarak GMIP kurutucu sistemindeki tüm komponentlerin ve bütün sistemin performansı değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL DÜZENEK VE ÖLÇÜMLER

2.1. Sistem Tanıtımı

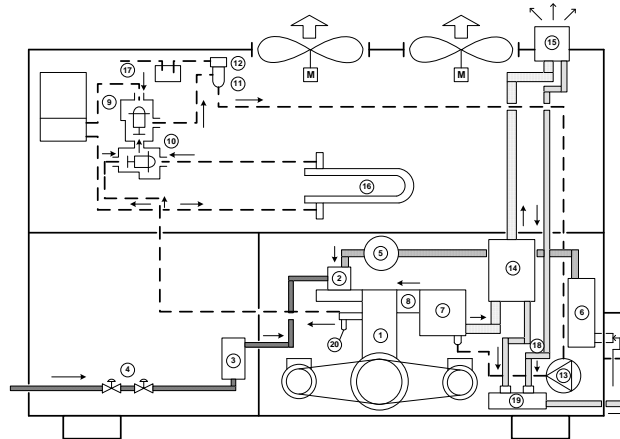
Bu çalışma kapsamında, kekik (*T.vulgaris*), ebegümece (*M.sylvestris*) ve rezene (*F.vulgare*) tıbbi aromatik bitkileri GMIP kurutucu sisteminde ince tabaka prensibine göre kurutulmuş ve kuruma kinetiği incelenmiştir. Ülkemizde giderek artan kurutma proseslerine ihtiyaç göz önüne alınarak, kurutma işlemlerinin yoğun enerji kullanımı ve ısı pompalarının enerji tasarrufu özellikleri birleştirilerek kurutma işlemlerinde enerji tasarrufu sağlanması amaçlanmaktadır.

Sistem temel olarak iki ana bölümden oluşmaktadır: (a) GMIP, (b) kurutma kanalları ve kabininden oluşan kurutma çemberi (DC). GMIP sisteminin şematik olarak gösterimi Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. GMIP Kurutucu Sisteminde Kurutma İşleminin ve Ölçümlerinin Akış Diyagramında Gösterimi

- a. GMIP: İçten yanmalı bir gaz motoru (GM), 2 adet scroll tip kompresör, kondanser, evaporatör, genişleme vanası, egzoz gazı ısı değiştiricisi (EAHE), çift borulu ısı değiştirici (DPHE) ve su pompasından oluşmaktadır. Sistem çevriminde, IP kısmında soğutucu akışkan R407-C, GM kısmında ise DPHE, EAHE ve motor silindir ceketlerinden ısı geri kazanımlarını (HRECJ) sağlamak amacıyla motor soğutma suyu kullanılmaktadır. Motor da yakıt olarak LPG kullanılmıştır. Yanma sonucu açığa çıkan ısıdan motor silindir ceketlerinden dolaştırılan soğutma suyu ile yararlanır. Aynı şekilde egzoz gazının atık ısı EAHE ile soğutma suyuna geçer. DPHE içerisinde soğutucu akışkan ve soğutma suyu arasında ısı transferi gerçekleşir. Bu sayede soğutucu akışkanın daha hızlı bir şekilde buharlaşması sağlanmış olur ve verimlilik artar. GM'nun şematik olarak gösterimi Şekil 2.'de verilmiştir.



Şekil 2. GMIP Sisteminde Bulunan GM Ünitesinin Şematik Gösterimi.

- b. Kurutma çemberi: Kurutma çemberi, kurutma kabini ve kurutma kanallarından meydana gelmektedir. Kurutma kabini 3m x 1m x 1m ebatlarındadır ve ürün kabini içerisinde bir bant motoru tarafından hareketlendirilen teflon malzemeden imal edilmiş konveyör bir bant

systemiyle taşınır. Kabin içerisindeki havanın etkin şekilde dolaşımının sağlanması için kabin içerisindeki çeşitli noktalara hava kanatları yerleştirilmiştir.

2.2. Ölçüm Sistemi

GMIP kurutucu sisteminde üç farklı tıbbi ve aromatik bitki türü olan kekik (*T.vulgaris*), ebegümeçi (*M.sylvestris*) ve rezene (*F.vulgare*) bitkileri kurutulmuşlardır. Bitkiler üst üste gelmeyecek şekilde tepsilere ince tabaka halinde konulmuş ve daha sonrasında kurutucu bandın üzerine yerleştirilmiştir. Kurutma işlemleri 45 °C sıcaklıkta ve 1 m/s hava hızında, 120-240 dakika süre aralığında gerçekleştirilmiştir. Hava hızı ölçümleri hava hızı ölçüm probu (Testo 0635.9540, Almanya) ve teleskopu (Testo 0430.0941, Almanya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ile görel nem ölçümleri, nem ve sıcaklık ölçüm probu (Testo 0636.2140, Almanya) kullanılarak yapılmış ve tüm bu ölçümler çok fonksiyonlu ölçüm cihazı (Testo 350-XL/454, Almanya) ile okunarak kaydedilmiştir. Kurumakta olan ürünün yüzey sıcaklığı infrared termometre ile (Testo 525-T2, Almanya), kurutucu ekipmanın yüzey sıcaklığı ise yüzey ısı ölçeri ile (METEX ME-32, Güney Kore) tespit edilmiştir. Ağırlık kayıpları analitik terazi (SartoriusGE7101, Almanya) ile izlenerek belirlenmiştir. IP'nin performansının belirlenmesi amacıyla soğutucu akışkanın dolaştığı borulara basınç ölçüm problemleri (Testo 0638.01941, Almanya) ile yüzey sıcaklığı ölçüm problemleri (Testo 0628.0019, Almanya) yerleştirilmiştir. Soğutucu akışkan kütsel debisinin belirlenmesi amacıyla lazer takometre ile kompresör devri ölçülmüştür. Egzoz gazı ekserji analizi için egzoz gazı analizörü ile yanma sonucunda açığa çıkan gazların yüzde oranları ölçülmüştür. DPHE ve EAHE'sinden geri kazanımları belirlemek için soğutma suyu ve egzoz gazı giriş-çıkış borularına ile yüzey sıcaklığı ölçüm problemleri (Testo 0628.0019, Almanya) yerleştirilmiştir. Tüm ölçümler 15 dakika ara ile kaydedilmiştir.

2.3. Malzeme

Rezene (*Foeniculum vulgare*), ebegümeçi (*Malva sylvestris L.*) ve kekik (*Thymus vulgaris*) bitkileri İzmir'de yerel bir marketten satın alınmıştır. Bitkiler yapraklarına ayrıldıktan sonra suyla yıkanmışlar daha sonra filtre kağıdına alınarak yüzeylerindeki fazla su uzaklaştırılmıştır. Bitkiler alındıktan en fazla 24 saat içinde kurutulmuşlardır.

3. ANALİZ

Ekserji analizi kütle, enerji ve ekserji denklilikleri, ekserji yıkımını ve enerji ve ekserji verimliliklerini bulmak için kullanılmaktadır.

Genel olarak, kararlı akış proseslerinde dört denge eşitliği vardır. Bunlar; kütle, enerji, entropi ve ekserji eşitlikleridir. Bu çalışmada, kütle, enerji ve ekserji denge eşitlikleri kullanılarak, ekserji kaybı (tahribi, yok oluşu veya yıkımı), enerji ve ekserji verimleri verilmiştir [12,13,14]. Sistemin kütle, enerji ve ekserji denklilikleri GMIP, GM ve kurutma işlemi için üç kademede incelenmiştir.

3.1. Kurutma İşleminin Enerji ve Ekserji Denklik Bağıntıları

Ekserji analizi yapılırken, kütle, enerji ve ekserji denge denkliliklerinin tamamından yararlanılır. Kurutma işlemi sırasında kurutucu kabin içerisinde kurutulan üründen kurutma havasına su geçişi ve kurutucu kabin yüzeyinden ortama ısı transferi vardır [15].

Kütle, enerji ve ekserji dengesi ısı girişi, ekserji tahribi ve enerji ve ekserji verimliliklerini bulmak için gereklidir. Düzenli-hal, düzenli-akış prosesi olarak kabul edilecektir. Genel kütle dengesi aşağıda gösterilmiştir.

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{cikan} \quad (1)$$

Burada, \dot{m} kütleli debiyi göstermektedir. Enerji dengesi, toplam giren ve çıkanlara eşittir. Enerjinin korunumunu temel alan termodinamiğin 1.yasasından hareketle giren ve çıkan enerjiler birbirine eşitlenerek aşağıdaki denklere ulaşılır:

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\zeta \quad (2)$$

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W} + \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta \quad (3)$$

Ekserji dengesi denklere oluşturulmuş, ekserji eşitlikleri düzenlenmiş, gerekli kabuller ve sadeleştirmeler yapılmıştır:

$$\sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_\zeta = \sum \dot{E}x_y \quad (4)$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{m}_g \psi - \sum \dot{m}_\zeta \psi = \sum \dot{E}x_y \quad (5)$$

Özgül ekserji veya akış ekserjisi (ex) terimi ve bu terimin her bir bileşen için eşitlikleri aşağıda belirtilmiştir:

$$\begin{aligned} ex_a = & (Cp_a + \omega_a Cp_v)(T_a - T_0) - \\ & T_0 \left[(Cp_a + \omega_a Cp_v) \ln \left(\frac{T_a}{T_0} \right) - (R_a + \omega_a R_v) \ln \left(\frac{P_a}{P_0} \right) \right] \\ & + T_0 \left[(R_a + \omega_a R_v) \ln \left(\frac{1 + 1,6078\omega_0}{1 + 1,6078\omega_a} \right) + 1,6078\omega_a R_a \ln \left(\frac{\omega_a}{\omega_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

3.2. GMIP Sistem Bileşenlerinin Enerji ve Ekserji Denklere

GMIP kurutma sisteminde dolaşan çevrim akışkanlarının dolaşımı ve bu çevrim sırasında ekserji hesaplamalarında kullanılan noktalar Şekil 1’de gösterilmiştir. Ayrıca sistemde dolaşan soğutucu akışkan, soğutma suyu, egzoz gazı ve hava gibi akışkanların izledikleri çevrimler gösterilmiş ve numaralandırılmıştır. Sistem parçalarının ekserji denklere yazılırken ve hesaplamaları yapılırken bu numaralandırma esas alınmıştır. Buna göre soğutucu akışkan için, 1: kompresör girişi / DPHE çıkışı, 2: kompresör çıkışı / kondenser girişi, 3: kondenser çıkışı / genişleme vanası girişi, 4: genişleme vanası çıkışı / evaporatör girişi, 5: DPHE girişi / evaporatör çıkışı, soğutma suyu için, 1: su pompası girişi/DPHE çıkışı, 2:EAHE girişi / su pompası çıkışı, 3: HRECJ girişi / EAHE çıkışı, 4:DPHE girişi / HRECJ çıkışı, egzoz gazı için, 1: EAHE girişi / motor çıkışı, 2: baca gazı çıkışı, hava için, 1: kurutucudan dönen havanın fan girişi, 2: kurutucudan dönen havanın kondenser girişi, 3: kurutucuya giden havanın kondenser çıkışı, 4: kurutucu kabin giriş havası, 5: kurutucu kabin çıkışıdır. Sistem parçalarının kütle ve enerji eşitlikleri, ekserji verimlilikleri yazılırken ve hesaplamaları yapılırken bu numaralandırma esas alınmıştır.

Kompresör

GMIP sistemi, IP (kompresör, kondenser, evaporatör ve genişleme vanası), GM ve kurutma kabininden meydana gelmektedir. GM ve kompresör için kullanılan enerji bağıntıları referanstan alınmıştır [16].

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_r (h_2 - h_1) = \dot{m}_r \left(\frac{h_{2s} - h_1}{\eta_s} \right) \quad (7)$$

\dot{W}_{comp} kompresör güç tüketimi, \dot{m}_r soğutucu akışkan kütleli debisi, h_1 soğutucu akışkanın kompresör girişindeki entalpi değeri, h_2 kompresör çıkışındaki entalpi değeri, h_{2s} izantropik sıkıltırmada soğutucu akışkan entalpi değeri, η_s ise kompresörün izantropik verimliliğidir. Soğutucu akışkanın kütleli debisi Eşitlik 8. ile bulunmuştur.

$$\dot{m}_r = \eta_v \rho_1 \frac{V_{comp} N_{comp}}{60} \quad (8)$$

V_{comp} , kompresör süpürme hacmi, N_{comp} kompresör devri, ρ_1 kompresörün emme hattındaki soğutucu akışkan yoğunluğu ve η_v kompresör volümetrik verimliliğidir. R407-C soğutucu akışkan kullanılan scroll tip kompresörlerde volümetrik verim Eşitlik 9.'daki gibi bulunur [16].

$$\eta_v = 1.053 - 0.028 \left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}} \right) \quad (9)$$

P_{dis} , soğutucu akışkanın kompresör çıkış basıncı, P_{suc} ise soğutucu akışkanın kompresöre giriş basıncıdır.

Isı Pompası ve Gaz Motoru

Kompresörlerin tahrik edilmesinde LPG yakıtı ile çalışan Toyota marka içten yanmalı bir motor kullanılmaktadır. Sistemde bulunan iki adet scroll tip kompresör kapasite yük durumlarına göre tek olarak veya birlikte çalışabilmektedir.

Yakıtın hacimsel debisi gaz sayacı ile ölçülmüştür. Yakıt kütleli debisi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_f = \rho_f \cdot \dot{V}_f \quad (10)$$

GMIP sisteminde kompresör güç tüketimi (\dot{W}_{comp}) ve GM güç tüketimi ($\dot{W}_{GM,i}$) Eşitlik 11. ile gösterilmektedir:

$$\dot{W}_{comp} = \dot{W}_{GM,i} \cdot \eta_{comp,mech} \cdot \eta_{belt} \quad (11)$$

Gaz motorunun ısı verimliliği aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{GM,i}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{GM,i}}{\dot{m}_{fuel} \cdot q_{LHV} \cdot \eta_{comb}} \quad (12)$$

Isı pompası (IP) ünitesinin ve GMIP sisteminin enerji-bazlı verimliliği sırasıyla aşağıda gösterilmiştir:

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{W}_{GM,i}} \quad (13)$$

$$COP_{GMIP} = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{m}_f \cdot q_{LHV} \cdot \eta_{comb}} \quad (14)$$

Giriş ekserjisi olarak adlandırılan yakıt ekserjisinin ise sadece kimyasal ekserjisi vardır. Havanın ekserjisi ise ihmal edilebilir. Ekserji girişi akımı $\dot{E}x_{in}$, aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\dot{E}x_{in} = \dot{m}_{fuel} \varepsilon_{fuel} \quad (15)$$

Burada, \dot{m}_{fuel} yakıt tüketiminin kütleli değeri ve ε_{fuel} yakıtın özgül ekserjisidir. Özgül ekserji değeri aşağıdaki eşitlik ile bulunur.

$$\varepsilon_{fuel} = q_{LHV} \varphi \quad (16)$$

burada, q_{LHV} yakıtın alt ısıl değeri, φ özgül yakıt ekserjisinin bulunmasında kullanılan kimyasal ekserji faktörüdür.

Buna göre GM, IP ünitesi, GMIP sistemi, kurutma kabini ve kanalları (DC) ile tüm sistemin (OS) ekserjetik verimliliği aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_{GM} = 1 - \frac{\dot{E}x_{GM,d}}{\dot{E}x_{in}} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{IP} = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{m}_{fuel} \cdot q_{LHV} \cdot \eta_{comb}} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{GMIP} = \frac{\dot{W}_{GM,i}}{\dot{E}x_{in}} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{OS} = \frac{\dot{E}x_{evap}}{\dot{E}x_{fuel}} \quad (20)$$

4. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

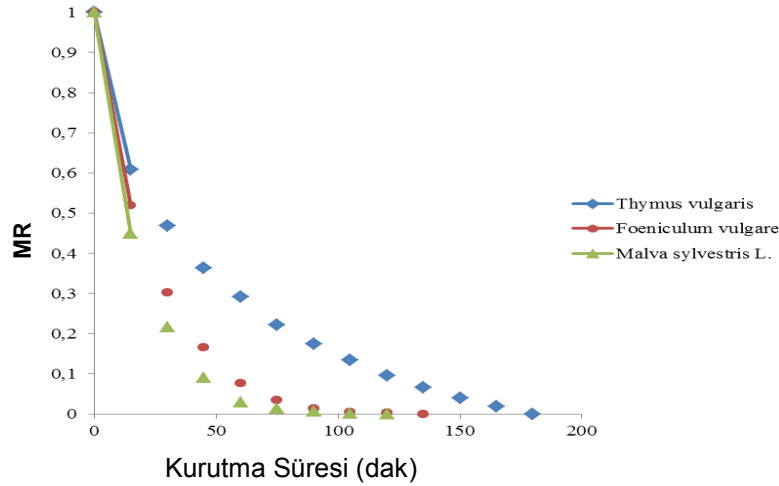
GMIP kurutucu sistemindeki temel parçalar; gaz motoru ünitesi, egzoz gazı ve motor silindir ceketlerinden ısı geri kazanımları sağlama amacıyla EAHE ve DPHE, iki adet scroll tip kompresör, havayı ısıtmak (soğutucu akışkanı soğutmak) amaçlı kullanılan bir ısı değiştirici (kondenser), soğutucu akışkanın basıncını düşürmek amaçlı kullanılan bir genişleme vanası ile soğutucu akışkanı ısıtmak (havayı soğutmak) amaçlı kullanılan bir evaporatör ve motor soğutma suyunun sistemde dolaşabilmesi için su pompasıdır. Bu ekipmanların verimliliğini belirlemek üzere orta düzeydeki işlem koşullarında (45 °C; 1,0 m/s; 120-180 dak) ayrıntılı bir ekserjetik performans analizi yapılmıştır.

Tablo 1. Gaz Motoru Ekserji Analizi Sonuçları

Bitki	Kuruma süresi (dk)	V_{fuel} (m^3)	V (m^3/s)	\dot{m}_{fuel} (kg/s)	\dot{E}_{fuel} (kW)	$\dot{E}_{x_{fuel}}$ (kW)	$\dot{E}_{x_{CW}}$ (kW)	$\dot{E}_{x_{EA}}$ (kW)
Ebegümece	120	0,818	0,00011	0,0003	13,7489	15,2886	0,94267	2,71
Kekik	180	0,972	0,00009	0,00023	10,8915	12,1112	0,44319	1,306
Rezene	135	0,851	0,00010	0,00027	12,7143	14,1381	0,86644	2,544

Bu çalışmada, referans durum, 10 °C ve atmosferik basıncın 101,325 kPa olduğu ortam koşulları alınmıştır. Suyun, havanın ve R-407C'nin termodinamik özellikleri, mühendislik denklem çözücü (EES) bilgisayar yazılım paketi kullanılarak bulunmuştur. Sistemdeki gaz motoru 1915-1940 dev/dak hızında çalışmıştır. Bu devirler arasında çalışan gaz motorunun deney verileri esas alınarak hesaplanan enerji ve ekserji analizi sonuçları Tablo 1.'de gösterilmiştir.

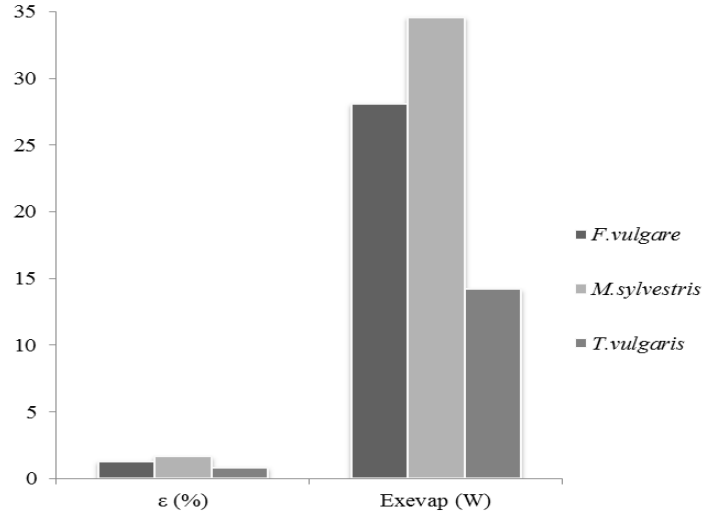
Ebegümece (*Malva sylvestris* L.) ve rezene (*Foeniculum vulgare*) bitkileri aynı nem seviyesine 120 ve 135 dakikada gelirken kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisi aynı nem seviyesine 180 dakikada gelebilmiştir. Bu da bize kekik (*Thymus vulgaris*) bitkisinin en düşük kuruma hızına sahiptir.



Şekil 3. 45 °C'deki kurutma işlemi sonucu ile elde edilen deneysel MR değerlerinin zamanla değişimi.

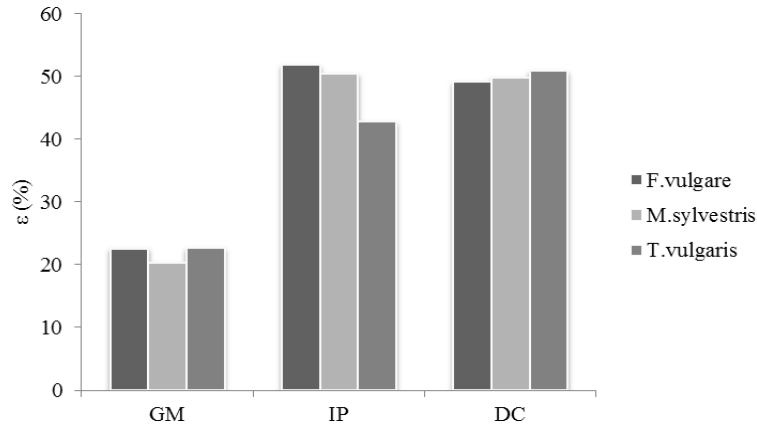
IP ünitesi ve GMIP sisteminin enerji-bazlı verimliliği hesaplanmıştır. IP ünitesinin COP değeri 4,197-5,058 arasında, GMIP sisteminin COP değeri ise 0,893-1,018 arasında değişmektedir.

Kurutma işlemi ekserji verimliliği % 0,80-1,62 ve iyileştirme potansiyeli (IP) değeri 1,753-2,160 kW değerleri arasında değişmektedir. Şekil 3.'de görüldüğü üzere, ebegümece bitkisinin kuruma hızı diğerleri arasında en yüksektir ve bu durumda Şekil 4.'de görülen durum ile uygunluk göstermektedir. Kurutma işleminde en çok su kaybeden bitki olan ebegümece aynı zamanda en yüksek ekserji verimliliğine sahiptir.



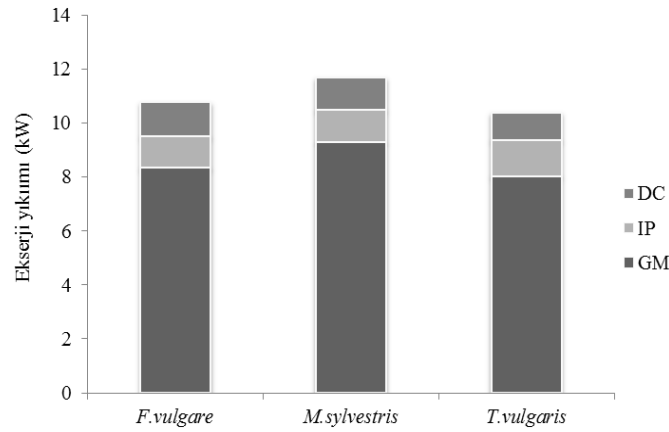
Şekil 4. Tıbbi Aromatik Bitkilerin Kurutma İşleminde Ekserji Verimliliği ve Evaporasyon Ekserji Miktarının Kıyaslanması

Kurutma deneyleri sistemde tek bir kompresör kullanılarak 1915-1940 devirleri arasında yapılmıştır. Ekserji yıkımı (\dot{E}_{x_d}) ve iyileştirme potansiyeli (IP) değerlerine göre sistemin diğer komponentleri yaklaşık olarak aynı önem derecesine sahiptirler. IP ünitesi ve kurutma çemberinin (DC) ekserji yıkımı akım değeri 1,171-1,344 kW ve 1,008-1,261 kW değerleri arasında, geliştirme potansiyeli akım değerleri 0,564-0,768 kW ve 0,498-0,641 kW arasında değişmektedir.



Şekil 5. Tıbbi Aromatik Bitkilerin Kurutma İşlemlerinde Kurutma Sistem Bileşenlerinin Ekserji Verimliliği Karşılaştırılması.

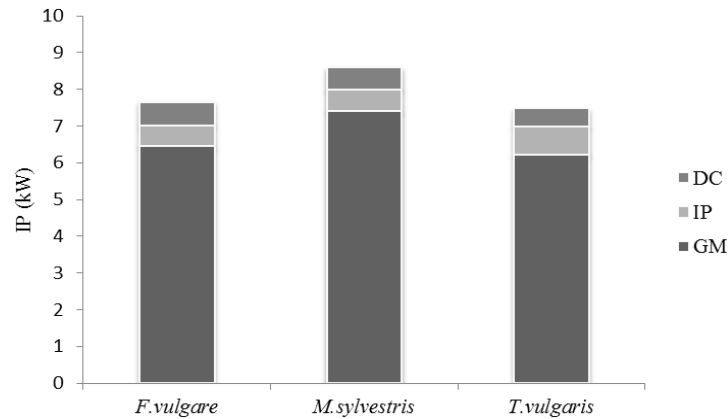
IP ünitesinde oluşan tersinmezliklerin çoğu kompresörde meydana gelen mekanik kayıplardan meydana gelmektedir. Kompresördeki enerji dönüşümü sırasında gerçekleşen mekanik ve elektriksel kayıplar da düşünüldüğünde, kompresör performansının geliştirilmesinin sisteme sağlayacağı katkı büyük olacaktır. Isı pompasındaki ısı değiştiricileri (kondenser ve evaporatör) verimliliklerinin artırılması ile sıcaklık farklarının azaltılması da, kompresör verimliliğini olumlu etkileyecektir. Dolayısıyla sistemin toplu tasarımı kompresör verimliliği açısından da önemlidir. Ancak kompresördeki kayıplar genel olarak sistem koşullarından bağımsızdır ve esas çözüm kompresör tasarım ve üretim teknolojisindeki gelişimle mümkündür. Bu çalışmada kullanılan kompresör tipi (scroll) ısı pompasıyla gerçekleştirilen ısıtma işlemlerinde verimliliği ile önerilen bir kompresör tipidir [17].



Şekil 6. Tıbbi Aromatik Bitkilerin Kurutma İşlemlerinde Kurutma Sistem Bileşenlerinin Ekserji Yıkımı Değerlerinin Karşılaştırılması.

Kurutma çemberi (DC), kurutma kabini ve kurutma kanallarından meydana gelmektedir. DC'de meydana gelen ekserji kaybı kurutma kabini ve kanalları yüzeyinden ortama gerçekleşen ısı transferinden kaynaklanmaktadır. Kabin ve kanal yalıtımlarının iyileştirilmesi ile tüm sistemin verimliliği artırılabilir.

GMIP kurutucu sisteminin performansının değerlendirilmesinde ekserji analizi methodu uygulanmıştır. Tüm sistemde geliştirme potansiyeli ve ekserji faktörü en yüksek olan component gaz motoru olarak hesaplanmıştır. İkinci olarak EAHE sistemde en düşük ekserji verimliliğine ve en yüksek geliştirme potansiyeli değerine sahip olan component olarak bulunmuştur. Geliştirme potansiyeli değerlerine göre sistemde bulunan diğer önemli componentler HRECJ, kurutma kanalları ve kompresör olarak hesaplanmıştır. GM, genişleme vanası ve kurutma kanallarının ekserji faktörü değerlerinin toplamı tüm sistemin ekserji faktörü değeri toplamının % 60'ını oluşturmaktadır. Bu componentler GMIP kurutucu sisteminde en yüksek ekserji oranına sahiptir.



Şekil 7. Tıbbi Aromatik Bitkilerin Kurutma İşlemlerinde Kurutma Sistem Bileşenlerinin İyileştirme Potansiyeli (IP) Değerlerinin Karşılaştırılması.

GM ünitesinin ekserji verimliliği, geliştirme potansiyeli ve ekserji faktörü değerleri sırasıyla % 20,45-22,7, % 6,19-7,36 kW ve % 35,22-39,46 olarak hesaplanmıştır. Sistemin diğer önemli componentleri ısı değiştiricilerdir (kondenser, evaporatör, EAHE, HRECJ ve DPHE). Kompresör ϵ and IP değerleri % 68,76-70,91 ve 0,21-0,23 kW, olarak bulunmuştur. Kompresör gücü, önemli ölçüde soğutucu akışkan giriş-çıkış basınçlarına bağlı olarak ve ısı değiştiricilerinde dolaşan soğutucu akışkanlarının arasındaki sıcaklık farkının azalmasıyla evaporasyon ve yoğuşma sıcaklıklarının birbirine yaklaşması ile meydana gelebilecek olan iyileştirmelere bağlı olarak azalır. Bu çalışmada kullanılan GMIP sisteminde iki adet scroll tip kompresör bulunmaktadır. Scroll tip kompresörler diğer kompresör türlerine oranla

daha verimli çalışmaktadırlar. Deneysel verilere göre bu çalışmada bulunan kompresöre değeri, literatürde bulunan benzer çalışmalarda bulunan pistonlu ve scroll tip kompresörlerden daha yüksek olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada kurutma kabini ve kurutma kanallarından yüksek ϵ değerleri elde edilmiştir. Kurutma kabini ve kanallarında oluşan tersinmezlikler genel olarak yalıtımın iyi olmamasından kaynaklı olarak yüzeyden çevreye ısı kaybı şeklinde meydana gelir. Ekserji verimliliği değerinin yüksek olması sistemde iyi bir yalıtımın olduğuna ve yüzeyden düşük miktarda ısı kaybının olduğuna işaretler. GMIP kurutucu sisteminde kullanılan kurutma kabininin ısı transferi yüzey alanı 12 m^2 'dir.

Tüm sistemin (OS) ekserji verimliliği (ϵ) değeri %48,24 - 51,28 arasındadır. Isı pompası, GMIP ve kurutma çemberi (DC) için ekserji verimlilikleri, %77,68-79,21, %39,26-43,24 ve % 81,29-81,56 olarak hesaplanmıştır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada GMIP kurutucu sisteminde üç farkı tıbbi aromatik bitki olan ebegümeci (*Malva sylvestris* L.), rezene (*Foeniculum vulgare*) ve kekik (*Thymus vulgaris*) bitkileri kurutulmuştur. Sistemin belirsizlik analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak bitkilerin kuruma davranışları belirlenmiştir. Kurutma işleminin ekserji analizi yapılmıştır.

GMIP kurutma sisteminin, ekserji analizi tek tek sistem bileşenlerinden hareketle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bazı sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Isı pompası sisteminde COP_{IP} değeri 4,197-5,058 arasında, tüm GMIP sisteminde COP_{GMIP} değeri 0,893 ve 1,018 arasında belirlenmiştir.
- Rezene (*Foeniculum vulgare*), ebegümeci (*Malva sylvestris* L.), ve kekik (*Thymus vulgaris*) bitkilerinin kuruma ekserji verimlilikleri değerleri sırasıyla; % 1,27, % 1,62 ve % 0,80 olarak hesaplanmıştır.
- Gaz motoru, genleşme vanası ve kurutma kanallarının ekserji değeri sisteme giren toplam ekserjinin % 60'ından fazlasını oluşturmaktadır.
- GMIP ünitesinin ekserjetik verimliliği % 39,26-% 43,24 aralığında kurutma çemberinin ekserjetik verimliliği % 81,29-% 81,56 aralığında ve tüm kurutma sisteminin ekserjetik verimliliği % 48,24-% 51,28 aralıklarında hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Hepbaşlı, A., Erbay, Z., İçier, F., Çolak, N. ve Hancıoğlu, E., 2007, Güneş enerjisi destekli gaz motoru tahrikli bir ısı pompası sistemi uygulaması, İKLİM 2007, II. Ulusal İklimlendirme Kongresi, 15-18 Kasım, Antalya – Türkiye, Bildiriler Kitabı, 351-366.
- [2] Hepbaşlı, A., İçier, F., Çolak, N. ve Hancıoğlu, E., 2006, Gaz motoru tahrikli güneş enerjisi destekli ısı pompalı bantlı bir kurutucu sistemin tasarımı, testi ve performansının değerlendirilmesi, TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı, Proje Başvuru Raporu.
- [3] Wongsuwan, W., Kumar, S., Neveu, P. and Meunier, F., 2001, A review of chemical heat pump technology and applications, Applied Thermal Engineering, 21:1489-1519.
- [4] Hepbaşlı, A., Ozgener, L., 2004, Development of geothermal energy utilization in Turkey: a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8:433-60.
- [5] Xu, Z. and Yang, Z., 2009, Saving energy in the heat-pump air conditioning system driven by gas engine, Energy and Buildings, 41:206-211.

- [6] Hepbasli, A., Erbay, Z., Icier, F., Colak, N. and Hancioglu, E., 2009, A review of gas engine driven heat pumps (GEHPs) for residential and industrial applications, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(1):85-99.
- [7] Dincer, I., 1998, Moisture transfer analysis during drying of slabwoods, *Heat and Mass Transfer*, 34:317-320.
- [8] Dincer, I. and Sahin, AZ., 2004, A new model for thermodynamic analysis of a drying process, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47, 645-652.
- [9] Kumarasamy, Y., Cox ,P.J., Jaspars, M., Nahar, L. and Sarker, SD., 2002, Screening seeds of Scottish plants for antibacterial activity, *Journal of Ethnopharmacology*, 83:73-77.
- [10] Mavi, A., Terzi, Z., Ozgen, U., Yildirim, A. and Coskun, M., 2004, Antioxidant properties of some medicinal plants: *Prangos ferulacea* (Apiaceae), *Sedum sempervivoides* (Crassulaceae), *Malva neglecta* (Malvaceae), *Cruciata taurica* (Rubiaceae), *Rosa pimpinellifolia* (Rosaceaea), *Galium verum* subsp. *Verum* (Rubiaceae), *Urtica dioica* (Urticaceae), *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 27:702-705.
- [11] Cheng, C. and Wang, Z., 2006, Bacteriostatic activity of anthocyanin of *Malva sylvestris*, *Journal of Forestry Research*, 17:83-85.
- [12] Kotas, T.J., 1995, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- [13] Szargut, J., Morris, D.R. and Steward, F.R., 1988, *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*, John Benjamins Publishing Co., ISBN-10: 0891165746, ISBN-13: 978-0891165743.
- [14] Çengel, Y.A. and Boles, M.A., 2006, *Thermodynamics An Engineering Approach*, 5th Edition, McGraw Hill, New York, USA.
- [15] Erbay, Z. and F. Icier (2009), Optimization of Drying of Olive Leaves in a Pilot Scale Heat Pump Dryer, *Drying Technology*, Vol. 27, pp.416-427.
- [16] Sanaye, S. and Chahartaghi M., 2010, Thermal modeling and operating tests for the gas engine-driven heat pump systems, *Energy*, 35:351–363.
- [17] Hepbasli, A. and M. T. Balta (2007), A study on modeling and performance assessment of a heat pump system utilizing low temperature geothermal resources in buildings, *Build. Environ.*, Vol. 42, pp. 3747–3756.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül GÜNGÖR

1985 yılında İzmir’de doğmuştur. İlköğrenimini Ankara İlkokulu’nda, orta ve lise öğrenimini ise, Konak Anadolu Lisesi’nde tamamlamıştır. 2008 yılında Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden mezun olmuştur. 2010 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı Termodinamik Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. Aynı yıl doktora eğitimine başlamış ve devam etmektedir. 2009 yılından itibaren Gediz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır ve halen devam etmektedir. Isıl sistemlerin geleneksel ve ileri ekserji analiz yöntemleriyle ısı pompalı kurutucularda gıda kurutması üzerine çalışmaktadır.

Arif HEPBAŞLI

"1958 yılı İzmir doğumludur. Yaşar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü öğretim üyesidir. Dr. Hepbaşlı'nın, iş yaşamı felsefesi; üniversite eğitimi, Ar-Ge (günümüzde son derece popüler olan RIC; Araştırma, Inovasyon ve Ticarileştirme) ve toplumsal (sanayiye) hizmet üçlüsünün dengeli olarak yürütülmesinden oluşmaktadır. Yaklaşık 31 yıllık iş yaşamının 10 yılı İzmir’in değişik sanayi kuruluşlarında farklı pozisyonlarda (1986-1996 yılları arasında, Proje Başmühendisi, Planlama-Kalite Sağlama Müdür Yardımcısı, Yatırımlar Müdür Yardımcısı ve Bakım Onarım Müdürü) ve geri kalanının çoğunluğu ise, üniversitede çalışarak geçti ve halen geçmektedir. 500 adetten fazla bilimsel yayının (220’den fazlası SCI bazında makale, Web of Science göre, h-indeks= 29 ve kendi atıfları olmadan 2311 atıf), Türkçe ve İngilizce olarak basılan değişik kitapların yazarı/ortak yazarıdır.

Çok sayıda ulusal/uluslararası bilimsel etkinliklerin organizasyonunda yer alan/almakta olan Dr. Hepbaşlı, prestijli uluslararası sekiz derginin yayın danışma kurulu üyesi olup, ayrıca, enerjiyle ilgili çok sayıda ulusal ve uluslararası dergilere ve projelere de hakemlik yapmaktadır. Değişik ulusal ve uluslararası üniversite ödülü olup, ilgi alanları çerçevesinde olmazsa olmaz olarak gördüğü sanayiye de uzun yıllardır danışmanlık hizmeti sunmaktadır. Evli ve bir kız babası olan Dr. Hepbaşlı, İngilizce ve Almanca bilmekte olup, Sertifikalı Enerji Yöneticisidir.

Hüseyin GÜNERHAN

1983 yılında İzmir Atatürk Lisesini bitirdi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü 1990 yılında, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi Anabilim Dalında yaptığı yüksek lisans öğrenimini 1992 yılında ve Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Anabilim Dalında yaptığı doktora öğrenimini 1999 yılında tamamladı. 1991-2001 yılları arasında, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi Anabilim Dalında öğretim elemanı görevi ve araştırma görevlisi unvanı ile çalıştı. 2001-2012 yılları arasında ise, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik Anabilim Dalında öğretim üyesi görevi ve yardımcı doçent doktor unvanı ile çalıştı. 2012 yılından itibaren aynı bölümde doçent doktor olarak çalışmaya devam etmektedir. Çalışma alanlarını, ısı transferi, termodinamik, ısı enerji depolama, ısı pompaları ve yeni enerji kaynakları oluşturmaktadır.