

HVAC SİSTEMLERİNDE EKSERJİ ANALİZİNİN GEREKLİLİĞİ VE UYGULAMALARI

Leyla ÖZGENER
Arif HEPBAŞLI

ÖZET

Günümüzde, HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sistemlerinde tüketilen enerjinin toplam enerji tüketimindeki payı, yaklaşık olarak % 20 tutmaktadır. Bu bağlamda, enerjinin ve hatta boşa giden enerjinin etkin ve verimli kullanımı, büyük önem taşımaktadır. Biz, mühendisler, HVAC sistemlerinin performansının değerlendirilmesinde, termodinamiğin birinci yasasını, başka bir deyişle, enerji denkliliğini (balansını) uygulama alışkanlığı içindeyiz. Oysa, bu sistemlerin işletilmesini sağlamak için gerek duyduğumuz enerji, kullanılabilir enerjidir.

Ekserji analizinin teorisi, büyük ölçüde kullanılabilir enerji analizinin gibidir. Ekserji, kullanılabilir enerji ve kullanılabilirlik önemli ölçüde benzerdir. Ekserji yok oluşu, ekserji tüketimi, tersinmezlik ve kayıp iş de önemli ölçüde benzerdir. Bu konudaki terminolojinin pek standartlaştırılmadığı görünmektedir.

Enerji, genellikle iş yada iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Oysa, bunun yerine, *enerji*; hareket yada *hareket* üretebilme kabiliyeti olarak tanımlanmalıdır. Bunun yanı sıra, *ekserji*; iş ya da iş yapabilme kabiliyeti olmaktadır. Enerji, bir proseste daima korunabilirken, ekserji ise daima tersinir proseslerde korunabilmekte, gerçek proseslerde ise, tersinmezlikler nedeniyle tüketilmektedir.

Ekserji analizi, bir sistemin enerji analizinden farklıdır. Ekserji analizinin sonuçları, genellikle, bir sistemdeki proseslerin daha fazla anlamlı ve duyarlı gösterilmesini sağlamak için göz önüne alınmaktadır. Bu yüzden, ekserji analizi, bu çalışmada ele alınan HVAC sistemlerinin analizinde önemli bir araçtır. Çünkü, bu analiz, mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli enerji sistemleri tasarlanmasının mümkün olup olmayacağını açığa kavuşturacaktır.

1. GİRİŞ

Enerji ekonomisi geniş bir alandır. Birçok çalışma, enerji ve ekonomiyle birlikte yapılmıştır. Bu nedenle, günümüzde enerji maliyetleri ile enerji fiyatları terimleri yaygın olarak benzer kabul edilmektedir. Fakat maliyetler gerçekte ilişkili değildir. Genelde enerji maliyeti, bir hammadde maliyeti içerir. Bunun nedeni, enerjinin genellikle değerinin olmayışıdır. Oysa, ekserji ekonominin esasıdır, miktarlar gibi ücret ve maliyetleri hassasiyetle kapsar.

İş, ekserji ve ekonomiyle bağlantılıdır, entropiden ekonomiye olan bağlantı 20-30 yıl önce araştırmalarla başarıyla ortaya konulmuştur. Bu alandaki araştırmalardan önemli biri Nicholas Georgescu Roegen' a aittir. "Entropi Yasası ve Ekonomik Proses" isimli 1971 yılında yayımlanan kitabı sürekli olarak birçok araştırmacıya ve projelerine referans kaynak olmuştur. Birçok araştırmacı ekserji ve ekonomi arasındaki ilişkiye dikkat çekmektedir. Rosen, bu gibi çabaların yalnız endüstriye tasarım aktivitelerinde değil, aynı zamanda topluma da yardımcı olabileceğine dikkat çekmektedir [1].

Günümüzde, HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sistemlerinde tüketilen enerjinin toplam enerji tüketimindeki payı, yaklaşık olarak % 20'yi bulmaktadır. Bu bağlamda, enerjinin ve hatta boşa giden enerjinin etkin ve verimli kullanımı, özellikle büyük önem taşımaktadır.

HVAC sistemlerinde, buharlaştırılmalı soğutma serbest enerji veya enerji kazanımı için kullanılır. Buharlaştırılmalı soğutmanın performansının verimli değerlendirilmesi kullanılan enerji ve iç hava kalitesinin geliştirilmesi için çok önemlidir. HVAC sistemlerinin performansının değerlendirilmesinde, termodinamiğin birinci yasasını, başka bir deyişle enerji balansını uygulamaya alışılmış olunabilir. Oysa, bu sistemlerin işletilmesini sağlamak için gerek duyulan enerji, kullanılabilir (yararlı) enerjidir. Kullanılabilir enerji bu sistemlerin çalıştırılması için gereken enerjidir. Bu teori Gibbs tarafından oluşturulduktan sonra bir çok mühendislik dalında gelişerek hızla yayılmıştır [2-3].

Termodinamikte ekserjinin bir diğer adı kullanılabilir iştir. HVAC sistemlerin ekserji analizi üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Fakat halen ekserji analizlerinde bazı hatalar mevcuttur. Bunun nedeni, fonksiyonel sistemlerin ve enerji akışının eksik sınıflandırılmasındandır, bu da gerçek ekserji verimliliğinin değerinin altında veya üstünde bir değer bulunmasına neden olacaktır. Ayrıca, atmosferik dengenin ölü hal dengesi olarak seçilmesi de hatalı sonuç bulunmasına yol açar. Az miktarda yoğunlaşan suyun etkisi büyük ekserji kaybı çıkarsa bile, gerçek kullanılabilir enerjinin kullanılmasında önemsizdir. Böylece ekserji verimliliği gerçek değer altında bulunur [2].

Bu çalışmada, öncelikle, ekserji konusu genel hatlarıyla ele alınacaktır. Daha sonra, HVAC sistemlerindeki bazı uygulamalarından derlenen ekserji analizleri verilecektir. Son olarak, elde edilen sonuçlar tartışılacaktır. Bir bakıma, HVAC tasarımcısı ve uygulamacısına, ekserjiye odaklı bir bakış açısı kazandırmaya çalışılacaktır.

2. ENERJİ VE EKSERJİ

Başka yerde [4] geniş kapsamlı olarak ele alındığı gibi, ekserji; enerji, çevre ve sürdürülebilir gelişmenin bir karışımı olarak karşımıza çıkar. Bu bölümde, sadece enerji ve ekserji arasındaki ilişki ele alınacaktır. Enerji, genellikle iş yada iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Bunun yerine, hareket ya da hareket üretme yeteneği olarak tanımlanmalıdır. Bu, şüphesiz daha az belirgindir, ama daha fazla doğru tanımlamadır. Ekserji ise, iş (=düzenli hareket) yada iş üretebilme kabiliyetidir. Hareket, sık sık belirli bir yönü olmayan, yani anlamsız iştir [5,6]. Başka bir bakış açısından, yani enerji verimliliği bakış açısından enerji; yaşamı konforlu kılan paradır [7]. Özetle, enerjinin para, hatta peşin para olarak tanımlanmasını önerebiliriz [8,9].

Termodinamik bakış açısından ekserji; bir referans çevreyle denge haline gelirken, bir sistem yada madde veya enerji akışıyla üretilebilecek maksimum miktarda iş olarak tanımlanır. Ekserji, referans çevreye göre tamamen kararlı dengede olmamanın sonucu olarak, değişime neden olan akış yada sistemin potansiyelinin bir ölçüsüdür. Enerjiden farklı olarak, ekserji; korunum yasasına uğramaz (ideal veya tersinir prosesler hariç olmak üzere). Ekserji daha çok, gerçek proseslerdeki tersinmezlikler nedeniyle, tüketilir yada yok edilir. Bir proses boyunca ekserji tüketimi, prosesle ilişkili tersinmezlikler nedeniyle ortaya çıkan entropiyle orantılıdır. Enerji ve ekserji kavramları, Tablo 1' de açık olarak kıyaslanmaktadır [10].

Enerji ile ekserji kıyaslandıktan sonra, ekserji analizi yapmanın önemini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz [10]:

- Enerji kaynakları kullanımının çevreye olan etkilerinin en iyi şekilde belirlenmesinde ana bir araçtır.
- Enerji sistemlerinin tasarımı ve analizi için termodinamiğin ikinci yasasıyla birlikte kütle ve enerjinin korunumu prensiplerini kullanan etkin bir yöntemdir.
- Daha fazla verimli kaynak kullanıma amacını destekleyen uygun bir tekniktir. Belirlenmesi gereken atık ve kayıpların yerleri, tipleri ve gerçek büyüklükleri ortaya çıkarılır.
- Mevcut sistemlerdeki verimsizlikleri azaltarak, daha verimli enerji sistemlerini tasarlamamanın nasıl mümkün olup- olamayacağını gösteren etkin bir tekniktir.

- e) Sürdürülebilir gelişmenin elde edilmesinde anahtar bir bileşendir.
f) Enerji politikaların oluşturulmasında kullanılabilecek önemli bir araçtır.

Tablo 1. Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması [10]

Enerji	Ekserji
Sadece madde yada enerji akış parametrelerine bağlıdır ve çevresel parametrelere bağlı değildir.	Madde veya enerji akışı ve çevresel parametrelerin her ikisine bağlıdır.
Sıfırdan farklı değerleri vardır (Einstein'ın bağıntısına göre, mc^2 ye eşittir).	Sıfıra eşittir (Çevreyle dengede olarak ölü durumda)
Tüm prosesler için termodinamiğin 1. yasasıyla gösterilir.	Sadece tersinir prosesler için termodinamiğin birinci yasasıyla gösterilir (Tersinmez proseslerde, kısmen yada tamamen yok olur).
Tüm prosesler için termodinamiğin ikinci yasasıyla sınırlıdır (tersinir olanlar da dahil).	Termodinamiğin ikinci yasası nedeniyle tersinir prosesler için sınırlı değildir.
Hareket yada hareketi üretme kabiliyetidir.	İş yada iş üretme kabiliyetidir.
Bir proseste her zaman korunur; ne vardan yok olur, ne de yoktan var edilir.	Tersinir proseslerde her zaman korunur, ama tersinmez proseslerde her zaman tüketilir.
Miktarın (niceliğin) bir ölçüsüdür.	Niceliğin ve entropi nedeniyle niteliğin (kalitenin) bir ölçüsüdür.

3. EKSERJİ VE EKONOMİNİN BİRLİKTE DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Ekonomik analizlerin performansları için bir çok YÖNTEM, ekserji esas alınarak geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Bu yöntemler, aşağıdaki isimler altında tanımlanır:

- Termoekonomik analiz,
- 2. yasa maliyet analizi,
- Ekserjik-ekonomik analiz.

Sonuç olarak, bu teknikler bir sistemin, işletilmesi ve tasarımının optimize edilmesine (en iyilendirilmesine) ve ekonomik kaynakların doğru tahsisinde yardımcı olur. Bir sistemin karlılığı, ekonomik fizibilitesinin en yüksek düzeyde doğruluğunun sağlanmasıyla mümkündür.

Ekserji-ekonomi araştırmacısı Tsatsaronis [1], ekserji-ekonomi yöntemlerini (oldukça zor ve karmaşık), dört ana grupta toplar. Bunlar:

- a) Ekserji-ekonomi maliyet hesabı,
- b) Ekserji-ekonomi hesap analizi,
- c) Ekserji-ekonomi benzerlik sayısı ve
- d) Üretim / maliyet verimlilik diyagramlarıdır.

4. EKSERJİ ANALİZİ

Bu bölümde, ölü hal, ekserji bileşenleri adı altında potansiyel, kinetik ekserji, fiziksel ve kimyasal ekserji, kavramlarına değinilecektir.

Enerji kaynaklarının doğru ve verimli kullanımları termodinamiğin 1. ve 2. yasalarıyla belirlenir. Enerji ısı bir sisteme yakıtla girer ve maliyeti ürün içinde hesaplanır. Termodinamiğin 1. yasası gereği enerji yok edilemez. Bu kavram bazen, kullanışlı bir tasarımla ve ısı analizle bozulabilir. Bu fikir enerjide uygulanmasa da ekserji kavramında termodinamiğin 2. yasası kapsamında kullanılır. Soğutma ünitesinden elde edilen 1 kJ enerji ile, 1 kJ elektrik enerjisi veren bir güç tesisinin verdikleri enerjilerin kullanışlılığı, ekonomikliliği ve kalitesi aynı değildir. Ekserji, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar. Aynı zamanda Termodinamiğin 1. yasasının da anlaşılmasına yardımcı olur.

4.1. Ölü Hal

Basınç, sıcaklık, hız, sistemin çevreden olan yüksekliği, iş geliştirmesine olanak verecektir. Sistem değişiklikleri çevreyle dengedeysen bu hale ölü hal (dead state) denir. Ölü halde, mekanik, ısı ve kimyasal denge sistem ve çevre arasında vardır. Bu denge hali, basınç sıcaklık, sistemin kimyasal potansiyelinin çevreyle eşit olmasıyla ilgilidir. Buna ilave olarak, sistemin hızı sıfır ve çevre koordinatlarından yüksekte değildir. Bu koşullar altında cansızlığın (durgunluğun) sistem içinde yada çevrede değişmesi yada aralarında bir etkileşim olması beklenmez.

Sistem ve çevre arasındaki bir değer denge tipi tanımlanabilir. Bu denge şeklinin sınırlandırılmasıdır. Burada koşullar mekanik ve ısı dengeyle belirlenmek zorundadır.

4.2. Ekserji Bileşenleri

4.2.1. Potansiyel ve Kinetik Ekserji

Bir sistemde nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilim etkilerinin yokluğunda sistemin ekserjisi dört bölümde incelenebilir. Bunlar: (a) kinetik ekserji E_{KE} , (b) potansiyel ekserji E_{PE} , (c) fiziksel ekserji E_F , ve (d) kimyasal ekserji E_{KM} . Bu durumda sistemin toplam ekserjisi,

$$E_X = E_{KE} + E_{PE} + E_F + E_{KM} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir.

Kinetik, potansiyel ve fiziksel ekserji literatürde termomekanik ekserji olarak özetlenir [11].

Buna göre birim kütle başına ekserki, başka bir deyişle özgül ekserji,

$$e_X = e_{KE} + e_{PE} + e_F + e_{KM} \quad (2)$$

olur.

Çevreyle ilişik olarak ekserji değerlendirildiğinde, sistemin kinetik ve potansiyel enerjisinin tamamının işe dönüşebilmesi durumunda,

$$e_{KE} = 0.5V^2 \quad (3)$$

$$e_{PE} = gz \quad (4)$$

yazılır. Burada V hız ve z çevreden olan yükseklik farkıdır. Sistemin çevreyle aynı bağlamda olduğu göz önüne alınırsa; e_{KE} ve $e_{PE} = 0$ olur. Bu durumda fiziksel ekserji en yüksek düzeyde elde edilebilir. Benzer şekilde, T sıcaklığında ve P basıncındaki sistem, T_o sıcaklığında ve P_o basıncındaki çevreyle etkileşim neticesinde teorik maksimum kimyasal iş elde edilebilir. Sistem sınırlı denge halinden denge haline geçer.

4.2.2. Fiziksel Ekserji

Kapalı sistemlerde fiziksel ekserji aşağıdaki bağıntıyla ifade edilebilir.

$$E_F = (U - U_o) + P_o (V - V_o) - T_o (S - S_o) \quad (5)$$

Burada U , V ve S , sırasıyla, iç enerji, hacim ve sistemin entropisidir. U_o , V_o ve S_o değerleri benzer özellikler olup sistemin sınırlı denge hali değerleridir.

4.2.3. Kimyasal Ekserji

Kimyasal ekserjiden elde edilebilecek maksimum iş, sistemin yada maddenin sınırlı denge halinden denge haline geçmesiyle mümkündür. Çevre dengesi (T_o , P_o) iken saf bileşenlerin konsantrasyonlarının kısmi basınçlarından ($P_{o,i}$) gidilerek her bir bileşenin kimyasal ekserjileri aşağıda verilen bağıntıdan hesaplanır.

$$E_{oi} = RT_o \ln(P_o/P_{o,i}) \quad (6)$$

Bunun yanı sıra, gaz karışımları ve ideal sıvıların ekserjileri,

$$e_{KM} = \sum_i x_i [e_{oi} + RT_o \ln(x_i)] \quad (7)$$

bağıntısından bulunur. x_i , maddenin bileşimindeki molar kesri, e_{oi} standart kimyasal ekserjiyi gösterir. Kimyasal ekserjinin gerçek çözümlerinde aşağıdaki bağıntıdan da yararlanılabilir:

$$e_{KM} = \sum_i x_i [e_{oi} + RT_o \ln(\gamma_i x_i)] \quad (8)$$

γ_i , i bileşenin aktiflik katsayısıdır.

5. EKSERJİ KAYIPLARI VE TERMODİNAMİK DENKLİLİK BAĞINTILARI

Ekserjetik, ekserji kavramına dayalı mühendislik bilimi için kullanılan uygun bir genel terimdir. Aşağıda, ekserji kayıpları ve verimleri kısaca açıklanacaktır [12].

5.1. Bir Sistem İçin Giren ve Çıkan Ekserjiler

Gerçek prosesler için giren ekserji (Ex_g), çıkan ekserjiden (Ex_c) daima fazladır. Bu denksizlik, ekserji yok oluşu olarak da adlandırılan tersinmezlikler nedeniyledir. Şekil 1' de gösterildiği gibi, çıkan ekserji, ürünün ($Ex_ü$) ve atığın (Ex_a) ekserjisi olmak üzere, iki kısımdan oluşur. Ekserji kaybının ve atık ekserjinin her ikisi, ekserji kayıplarını gösterir. Ama, tanımlama olarak, tersinmezliklerin hiçbir ekserjisi yoktur ve bu yüzden, doğrudan hiçbir çevresel etkisi yoktur. Bununla beraber, büyük miktarda bir ekserji yok oluşu, çevresel zarara yol açabilen giren ekserjinin fazla miktarda kullanımı anlamına gelebilir.

5.2. Ekserji Verimleri

Ekserji verimi basit olarak, kullanılan ekserji olarak tüm ekserji girişi ve yararlanılan ekserji olarak da tüm giren ekserjiyi tanımlar. Yani,

$$\eta_{ex,1} = \frac{Ex_c}{Ex_g} \quad (9)$$

Bununla beraber, çoğu proseslerde çıkanın bir kısmı atık olup,

$$E_c = E_ü + E_a \quad (10)$$

bağıntısı yazılabilir. Böylece, ekserji verimi,

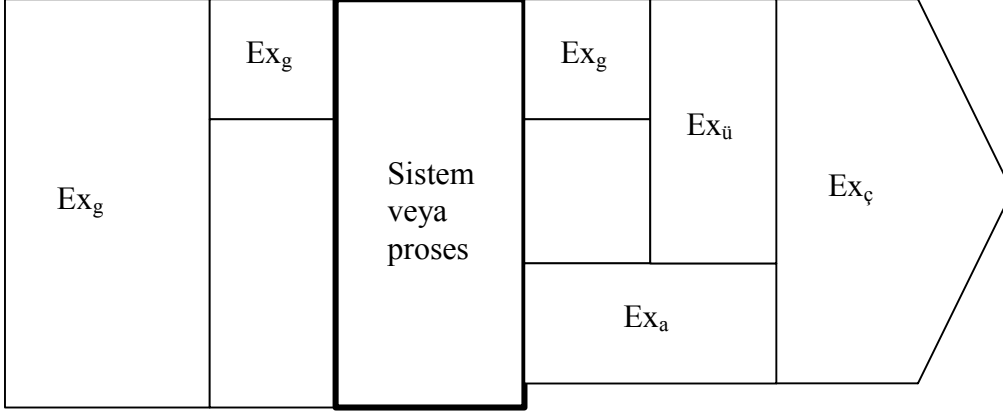
$$\eta_{ex,2} = \frac{Ex_c - Ex_a}{Ex_g} = \frac{E_ü}{E_g} = \eta_{ex,1} - \frac{Ex_a}{Ex_g} \quad (11)$$

şeklinde elde edilebilir.

Bazen ekserjinin bir kısmı sistemden etkilenmeden geçer, yani geçen ekserji (Ex_{ge}) söz konusu olur. Bu durumda,

$$\eta_{ex,3} = \frac{Ex_{\check{c}} - Ex_a - Ex_{ge}}{Ex_g - Ex_{ge}} = \frac{Ex_{\check{u}} - Ex_{ge}}{Ex_g - Ex_{ge}} \quad (12)$$

elde edilir.



Şekil 1. Bir sistem için giren ve çıkan ekserjiler [12]

5.3. Termodinamik Denklik Bağıntıları

Termodinamik denklik bağıntıları vermeden önce, bir sistemdeki bir miktar için genel denklik aşağıdaki gibi yazmak daha doğru olacaktır [13].

$$\text{Giren} + \text{Üretilen} - \text{Çıkan} - \text{Tüketilen} = \text{Depolanan} \quad (13)$$

Burada; giren ve çıkan, sırasıyla, sistem sınırlarına giren ve sınırlarından çıkan miktarları, üretilen ve tüketilen, sırasıyla, sistem dahilinde üretilen ve tüketilen miktarları ve depolanan ise, sistem dahilindeki miktarın gelişimini (pozitif ya da negatif) gösterir. (13) bağıntısı, miktarlar olarak, integral şeklinde ve akımsal olarak (birim zamanda) diferansiyel şeklinde ifade edilebilir. Diferansiyel denklik, belirli bir zaman aralığında bir sistemde ne olduğunu açıklar ve integral balans, iki zaman arasında bir sistemde ne olduğunu belirtir. Diferansiyel denklilikler genellikle sürekli proseslere uygulanırken, integral denklilikler yığın (batch) proseslere uygulanır. Sürekli akışlı-sürekli açık sistemler için depolanan akım terimi diferansiyel denklilikte sıfırdır.

Daha önce de belirtildiği gibi, korunum yasasına (nükleer reaksiyonları ihmal ederek) uğrayan enerji, ne üretilir ne de tüketilebilir. Ekserji ise, tersinmezlik nedeniyle bir proses boyunca tüketilir ve bu yüzden korunamayan bir yasayla karşı karşıya kalır. Sonuç olarak, genel denklik bağıntısı (Eşitlik 13) bu miktarlar için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\text{Giren Enerji} - \text{Çıkan Enerji} = \text{Depolanan Enerji} \quad (14)$$

$$\text{Giren Ekserji} - \text{Çıkan Ekserji} - \text{Tüketilen Ekserji} = \text{Depolanan Ekserji} \quad (15)$$

(14) ve (15) no'lu çıkan bağıntıları, Eşitlik (10) da gösterildiği gibi, iki bileşene de ayrılabilir. Yani,

$$\text{Çıkan Enerji} = \text{Çıkan Ürün Enerjisi} + \text{Çıkan Atık Enerji} \quad (16)$$

$$\text{Çıkan Ekserji} = \text{Çıkan Ürün Ekserjisi} + \text{Çıkan Atık Ekserji} \quad (17)$$

6. HVAC SİSTEMLERİNDE EKSERJİ UYGULAMALARI

Bu bölümde, öncelikle, HVAC sistemlerine analitik olarak kısaca bir bakış yapılacak ve daha sonra ekserjinin bazı uygulama sonuçları, detaylı hesaplara girmeden, elde edilen sonuçlar bazında sunulmaya çalışılacaktır.

6.1. HVAC Sistemlerine Analitik Bakış

Ekserji, enerjinin iş yapabilme yeteneğini ayarlar. Akışkan akışı için tersinir proseste çevreyle denge seviyesi eşitlene kadar iş üretilebilir [2]. Bu durumda, ekserji genellikle

$$e_x = (h - T_0s) - (h_0 - T_0s_0) \quad (18)$$

bağıntısıyla ifade edilir ve aşağıdaki şekilde de gösterildiği gibi akış ekserjisi olarak adlandırılır.

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (18b)$$

HVAC sistemlerinde nemli havayla karşılaşılması nedeniyle, nemli havanın yaklaşık ideal davranabileceği ve akış ekserjisinin de

$$\begin{aligned} e_x = & (c_{pa} + \omega c_{pv}) [T - T_0 - \ln(T / T_0)] \\ & + (1 + 1.608\omega) R_a T_0 \ln(P / P_0), \\ & + (R_a T_0 \{ (1 + 1.608\omega) \ln[((1 + 1.608\omega_0) / (1 + 1.608\omega))] \\ & + 1.608\omega \ln(\omega / \omega_0) \} \end{aligned} \quad (19)$$

şeklindeki bağıntıya eşit olacağı kabul edilebilir. Burada, T , P ve ω sırasıyla sıcaklık, basınç ve havanın mutlak nemini (özellik nemini) verirken, c ve R özgül ısı ve gaz sabitini, "o" indisli terimlerde ölü hal durumundaki değerleri göstermektedir.

HVAC sistemlerinde 2. yasa verimi (ekserji verimi)

$$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{\text{üretilen}}}{\dot{A}_{\text{üretilen}} + \dot{A}_{\text{bozulan}} + \dot{A}_{\text{kayıp}}} \quad (20)$$

bağıntısından bulunabilir. Burada, \dot{A} kullanılabilir işi ifade eder.

HVAC sistemlerindeki bir önemli nokta da, doğru ele alınan sistem için ölü hal noktasının belirlenmesidir. Genellikle ölü hal olarak atmosferik koşullar seçilir. Oysa, atmosferik hava doymamıştır, kullanılabilir bir enerjiye sahiptir. Bu yüzden maksimum iş W ,

$$W = e_{x0} + (\omega_{os} - \omega_0) e_{xw} - e_{xos} \quad (21)$$

Eşitliğinden bulunur. Burada, "os" dış hava sıcaklığıyla ilintili havanın mutlak nemini ifade ederken, dış havanın ekserjisi e_{xos} ve suyun ekserjisi e_{xw} aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunur.

Nemli hava için ekserji:

$$\begin{aligned} e_{xos} = & (R_a T_0 \{ (1 + 1.608\omega_{os}) \ln[((1 + 1.608\omega_0) / (1 + 1.608\omega_{os}))] \\ & + 1.608\omega_{os} \ln(\omega_{os} / \omega_0) \} \end{aligned} \quad (22)$$

Su için ekserji:

$$e_{xw} = - R_a T_0 \ln(P_{w0} / P_{wos}) \quad (23)$$

6.2. Örnek HVAC Ekserji Analizleri

Bu bölümde iki farklı HVAC uygulamasına ait ekserji analizi sonuçları verilecektir. Daha önce de belirtildiği gibi, burada karmaşık hesapları vermektense, uygulama sonuçlarıyla bir bakış açısı kazandırmaya çalışılacaktır.

6.2.1. Bir Ofisin İklimlendirilmesi

HVAC sistemiyle iklimlendirme yapılan 30 m² büyüklüğünde bir ofisi ele alalım. Dış hava sıcaklığı ısıtma modunda -3 °C, iç hava sıcaklığı 20 °C, dış havanın bağıl nemi % 81 ve iç havanın bağıl nemi % 45' dir. Soğutma modunda ise, dış hava sıcaklığı 35.8 °C, iç hava sıcaklığı 25.5 °C, dış hava bağıl nemi % 52.8 ve iç hava bağıl nemi % 57.5' dir. Odada 10 kişinin saatlik taze hava ihtiyacının karşılandığı kabul edilsin. Buna göre, daha önceki bölümlerde verilen bağıntıların kullanılmasıyla, Tablo 1' de verilen sonuçlara ulaşılır.

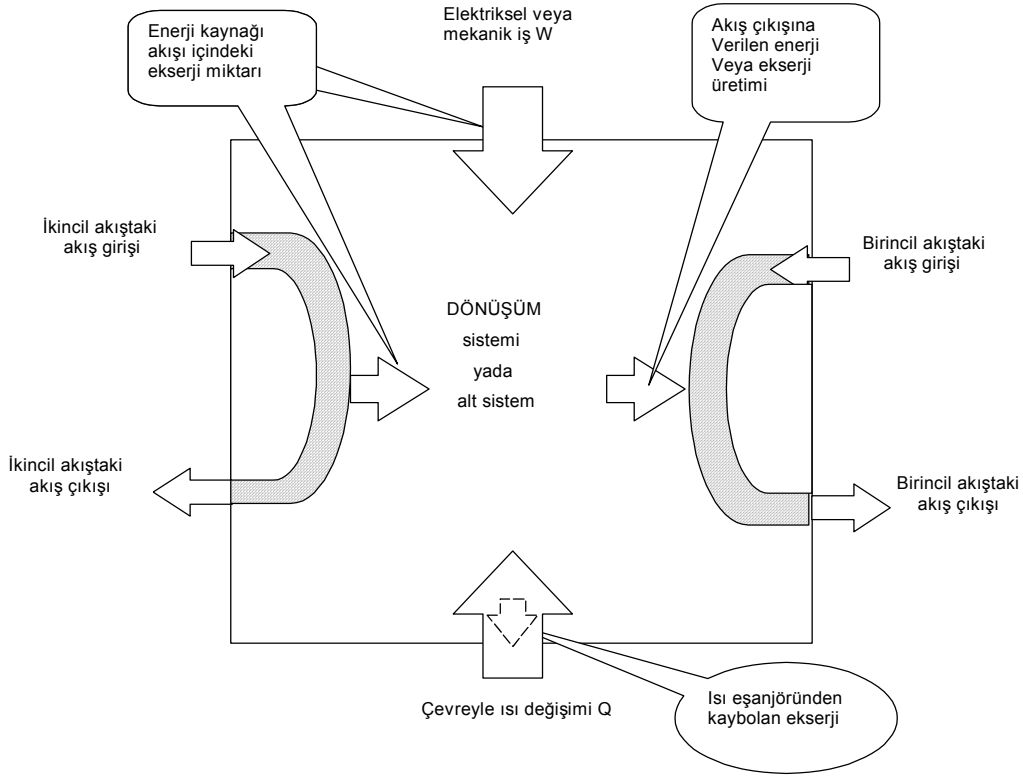
Tablo 2. Isıtma ve soğutma modunda çalıştırılan HVAC sisteminin enerji ve ekserji bilgileri

	Isıtılan mahal koşulları			Tüm iklimlendirme ünitesi
	Oda ısı yükü	Oda nemliliği	Taze hava	
Enerji ihtiyacı (kW)	3.82	-0.7	3.87	6.99
Ekserji ihtiyacı (kW)	0.2997	-0.02794	0.1194	0.4467
Ekserji ihtiyacı (kW)		0.4467		2.3
Ekserji verimi η_{ex}		87.6%		19.42%
Enerji verimi		100%		304%

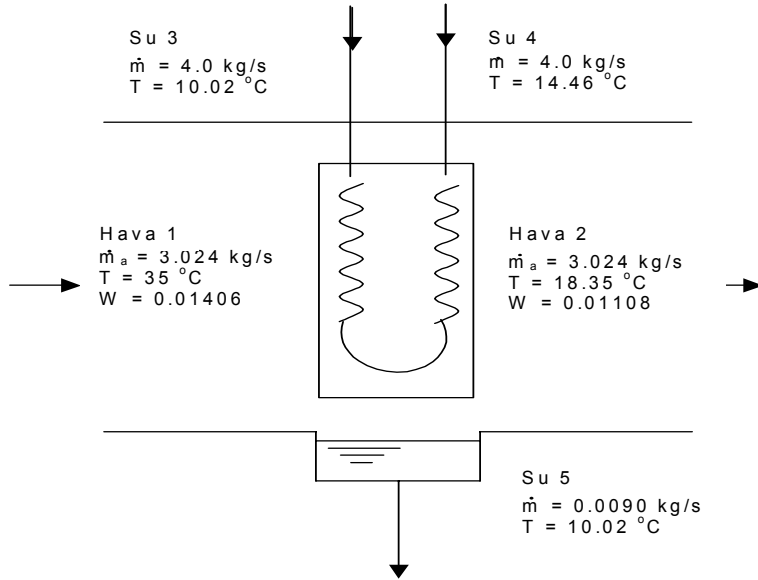
	Soğutulan mahal koşulları			Tüm iklimlendirme ünitesi
	Oda ısı yükü	Oda nemliliği	Taze hava	
Enerji ihtiyacı (kJ/h)	-3.9	-0.7	-3	-7.6
Ekserji ihtiyacı (kJ/h)	0.1345	-0.04772	0.1194	0.356
Ekserji ihtiyacı (kJ/h)		0.356		2.97
Ekserji verimi η_{ex}		84.7%		12%
Enerji verimi		100%		-256%

Tablo 2'deki sonuçlar incelendiğinde, ekserji verimleri veya verimliliğin çok küçük olduğu görülür. Bu da sistem performansının geliştirilebileceğini gösterir. Şekil 2' de HVAC sistemlerin enerji akış şeması sistem performansını etkileyen unsurlar sınıflandırılarak gösterilmiştir.

Şekil 3' de verilen diğer bir örnek incelendiğinde, yoğuşan küçük miktardaki su düşük sıcaklıkta sistemin enerji kullanımına göre önemsiz gözükse de ekserji üretimini artırmaktadır. Buna göre soğutma koşulu için bulunan sonuçlar Tablo 3' de verilmiştir.



Şekil 2. HVAC sistemlerin enerji akış şeması [2]



Şekil 3. HVAC soğutma ve nemlendirme [2]

Tablo 3. Soğutma ve nemlendirme için ekserji bilgileri [2]

Ekserji kJ/h	Hava 1	Hava 2	Su 3	Su 4	Su 5	Ekserji Üretimi	Ekserji Desteği	Ekserji Verimliliği
	3.854	6.611	18.4567	12.536	0.0035	2.757	5.92	45.05

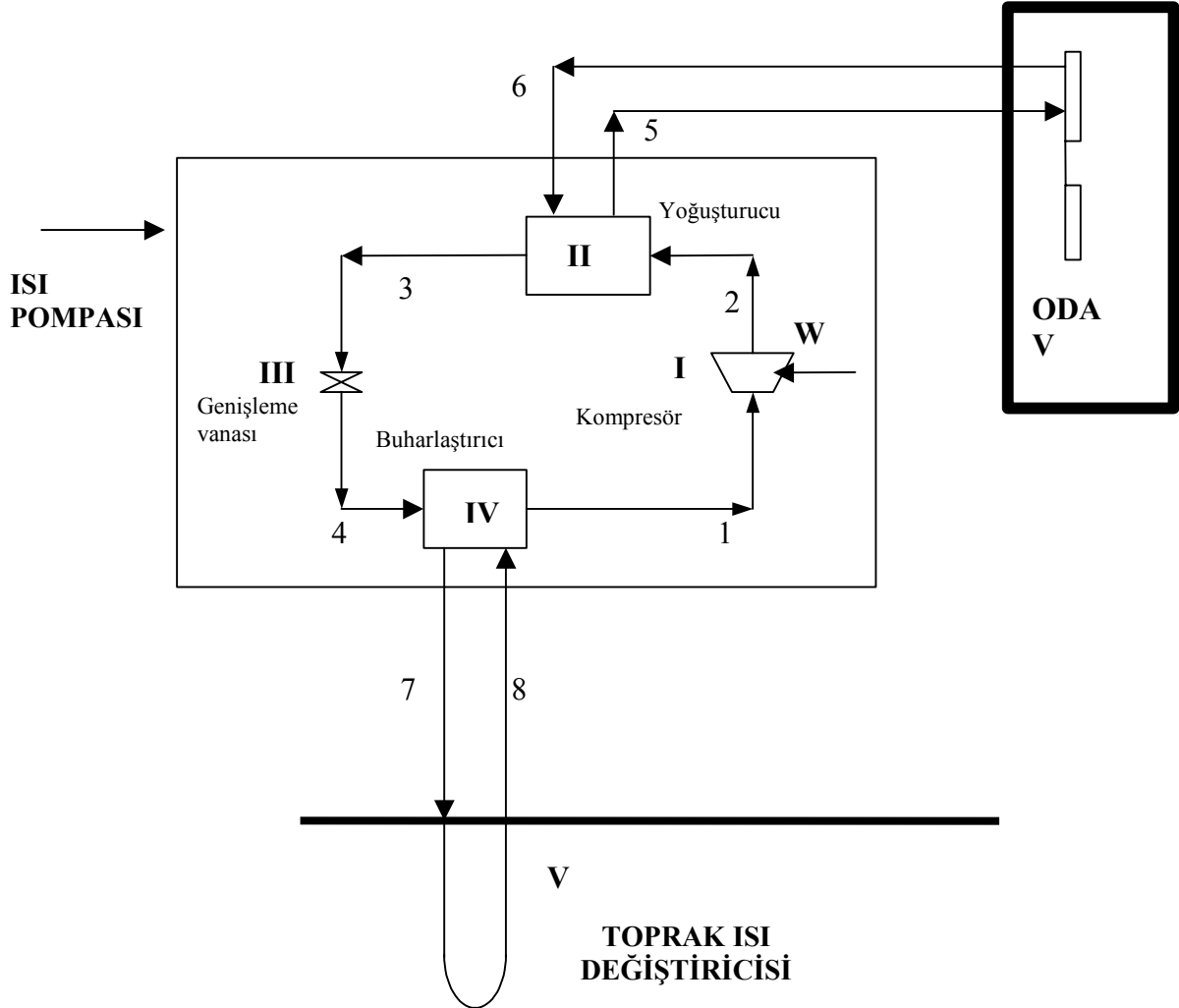
6.2.2. Toprak Kaynaklı (Jeotermal) Isı Pompası Isıtma

Genellikle, jeotermal ısı pompaları (JIP) olarak adlandırılan toprak kaynaklı ısı pompaları (TKIP), 1995 yılından beri, Amerika ve Avrupa'da % 59 veya yıllık % 9.7 olarak en fazla gelişme göstermiştir. Dünya'daki 26 ülkede kurulu kapasitesi; 6 875 MW_t ve yıllık enerji kullanımı ise, 23 287 TJ/yıl 'dır. Kurulu olan cihazların gerçek sayısı, 512 678 dolayındadır. Bunun yanı sıra, JIP' ları, son dört yıldır, ülkemizde gündeme gelmiş ve birçok konutta ısıtma/soğutma amaçlı olarak uygulamaya sokulmuştur. Bu sistemlerin ülkemizdeki ve dünya'daki gelişimleri ve fizibilitesi başka yerde [14-19] geniş kapsamlı olarak işlenmiştir. Bunun yanı sıra, bu sistemlerin tasarımı ve testi de, HVAC mühendisleri bakımından ilgili kaynaklarda [20,21] ele alınmıştır.

JIP sistemi, Şekil 4' de gösterildiği gibi, üç ana kısımdan oluşmaktadır [22]:

- Isı pompası cihazı
- Toprak ısı değiştiricisi
- Isı dağıtım sistemi

Odanın ısıtma ve soğutma yükleri, sırasıyla, 3.8 ve 4.2 kW' dır. Toprak ısı değiştiricisi düşey tipte olup, derinliği 50 m' dir. Sisteme ait teknik özellikler ve performansının değerlendirilmesi başka yerde [23,24] geniş kapsamlı olarak verilmiştir.



Şekil 4. Jeotermal (toprak kaynaklı) ısı pompası sisteminin şematik gösterilimi [22]

Tablo 4. JIP sisteminin termodinamik özellikleri [25]

Durum	T (°C)	P (MPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	\dot{m} (kg/s)	ψ (kJ/kg)	E_x (kW)
1	3.0	0.48	252.4771	0.9395	0.0188	43.8363	0.8241
2s	94.6984	2.60	296.6314	0.9395	0.0188	87.9906	1.6542
2a	106.2522	2.60	307.67	0.9691	0.0188	90.2039	1.6958
3	60.0	2.60	126.9696	0.4393	0.0188	67.4634	1.2683
4	-1.1530	0.48	126.9696	0.4780	0.0188	55.9250	1.0514
5	41.3100	-	172.8410	0.5893	0.2040	1.7817	0.3635
6	37.3200	-	156.1469	0.5358	0.2040	1.0386	0.2119
7	6.8	-	28.4512	0.1029	0.47	2.4121	1.1337
8	8.0	-	33.4720	0.1208	0.47	2.0960	0.9851
0 (soğutucu akışkan)	25.0	0.10	274.1235	0.1591	-	0	
0 (sirkülasyon suyu)	25.0	0.10	104.87	0.3673	-	0	

Tablo 5. JIP sisteminin enerji ve ekserji denklilik sonuçları [25]

A. Enerji denkliliği						
Giren Enerji			Çıkan Enerji			
Açıklama	Nominal değer (kW)	Toplam belirsizlik (%)	Açıklama	Nominal değer (kW)	Toplam belirsizlik (%)	
Verilen elektrik gücü	2.0587	± 4.36	Fan-coil de verilen ısı akımı*	3.4056	± 3.42	
Kompresöre verilen iş akımı*	1.0376	± 3.45				
Toprak ısı değiştiricisinde eklenen ısı akımı	2.3595	± 3.42				
B. Ekserji denkliliği						
Bileşen	\dot{Q}		\dot{W}		(Tersinmezlikler) $\dot{I} = E_{x_{kayı}} = T_0 \dot{S}_{üretim}$	
	Nominal değer (kW)	Toplam belirsizlik (%)	Nominal değer (kW)	Toplam belirsizlik (%)	Nominal değer (kW)	Toplam belirsizlik (%)
Kompresör (I)	-	-	-1.0376	± 3.45	0.1659	± 3.79
Yoğuşturucu (II)	-	± 3.42	-	-	0.2800	± 3.79
	3.4056					
Kısma vanası (III)	-	-	-	-	0.2169	± 3.79
Buharlaştırıcı (IV)	2.3595	± 3.45	-	-	0.0785	± 3.79
Fan coil veya oda (V)	-	± 3.42	-	-	0.2121	± 3.42
	3.4056					
Toprak ısı değiştiricisi (VI)	2.3595	± 3.42	-	-	0.0497	± 3.42
Kompresördeki mekanik ve elektriksel kayıplar					1.0211	± 5.56

Isı akımı (heat transfer rate) ile birim zamandaki ısı geçiş miktarı kastedilmektedir.

Şekil 4' de gösterilen JIP sisteminin Şubat 2001'de ve ısıtma modunda yapılan deneyler sonucunda, elde edilen termodinamik özellikler Tablo 4' de gösterilmiştir. Bu tablodan görüleceği üzere, kompresöre iş girişi nedeniyle akış ekserjisinde (ψ) artışa yol açılır ve sistemin diğer bileşenlerde ise, tersinmezlikler nedeniyle, ekserji akışında bir azalma söz konusu olur. Kütle, enerji ve ekserji denkliklik bağıntılarının kullanılmasıyla, Tablo 5' de verilen sonuçlara ulaşılır. Bu sonuçlar, başka yerde [25], istemdeki tersinmezlikler ve olası iyileştirmeler bakımından geniş kapsamlı olarak irdelenmiştir.

7. SONUÇLAR

Enerji (birinci yasa) analizi, ısı sistemlerinin analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Termodinamiğin birinci yasası, sadece enerjinin korunumu ile ilişkilidir ve sistemin performansının nasıl, nerede ve ne kadar azaltıldığı hakkında hiçbir bilgi vermez. Buna karşın ekserji analizi, enerji sistemlerinin tasarımı, optimizasyonu (en iyilendirilmesi) ve performansının değerlendirilmesinde, yararlı bir araçtır. Ekserji analizi genellikle, sistemin maksimum performansını belirlemek ve ekserji kaybı yerlerini saptamak amacıyla yapılır [26].

Ülkemizde, HVAC sistemlerin ekserji analizi ile sınırlı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada, bir yandan ekserji genel hatlarıyla ele alınmaya çalışıldı, öte yandan da iki farklı uygulama örneği verilerek, konu çok yönlü tartışıldı.

Ülkemizde, HVAC sistemlerde, maalesef, enerji analizinin bile tam olarak yapılmadığı bir süreçte, burada ele alınan ekserji analizi, çok karmaşık, belki de farklı (lüks olarak) algılanabilir. Ancak, enerji, çevre ve sürdürülebilir gelişmenin mükemmel bir karışımı olan ekserjinin, gerek tasarım gerekse de işletme aşamasında ele alınması, enerji verimliliği sağlamada ve hatta ülkelerin enerji politikalarının oluşturulmasında [10] anahtar bir rol oynadığı göz ardı edilmemelidir. Gelişmiş ülkelerde, "*Enerji Verimliliği Müşavirliği*" (maalesef bu kavram bile ülkemizde henüz tam uygulamaya girememiş) yanında, örneğin; ekserji konusundaki önemli çalışmalarıyla tanınan G. Wall [5,6]'un "*Ekserji Müşaviri*" olarak hizmet etmesi, konunun önemini açıkça ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, burada sunulan çalışmanın, HVAC mühendislere farklı bir bakış açısı kazandıracığı ve ileride "*HVAC Ekserji Müşavirliği*", hizmetlerinin de ülkemizde verilmeye başlanacağı yazarlar tarafından umulmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] ROSEN, M.A., "Exergy and Economics: Is Exergy Profitable", Exergy-An International Journal, Sayfa: 1-3, 2002.
- [2] CHENGQIN, R., NIANPING, L. ve GUANGFA, T., "Principles of Exergy Analysis in HVAC and Evaluation of Evaporative Cooling Schemes", Building and Environment, Cilt No: 37, Sayfa: 1045-1055, 2002.
- [3] CHENGQIN, R., GUANGFA, T., NIANPING, L. ve JING, Y., "Discussion regarding the Principles of Exergy Analysis Applied to HVAC Systems", Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Cilt 1 (1), Sayfa: 137-141, 2002.
- [4] ROSEN, M.A. ve DINCER, I., "Exergy as the Confluence of Energy, Environment, and Sustainable Development", Exergy- An International Journal, Cilt No: 1(1), Sayfa: 3-13, 2001.
- [5] WALL, G., "Exergy Conversion in the Japanese Society", Energy, Cilt No: 15(5), Sayfa: 435-444, 1990.
- [6] WALL, G., "Exergy, Society and Morals", Journal of Human Values", Cilt No: 3(2), Sayfa: 193-206, 1997.
- [7] SHINKAWA, N., "An Outlook for Energy in Energy Conservation Point of View", Kyushu International Center, JICA ve KITA, Kitakyushu, Japan, 1998.

- [8] ENERGY EFFICIENCY OFFICE, EEO., Energy, Environment and Profits, Making a Corporate Commitment, Department of the Environment, England, 1993.
- [9] HEPBASLI, A. ve OZALP, N. "Development of Energy Efficiency and Management Implementation in the Turkish Industrial Sector", Energy Conversion and Management, Cilt No: 44 (2), Sayfa: 231-249, 2003.
- [10] DINCER, I., "The Role of Exergy in Energy Policy Making", Energy Policy, Cilt No: 30, Sayfa: 137-149, 2002.
- [11] HEPBAŞLI, A., Ekserji Ders Notları, Ege Üniversitesi, Makina Müh. Bölümü, 2003.
- [12] WALL, G., "Conditions and Tools in the Design of Energy Conversion and Management Systems of a Sustainable Society", Energy Conversion and Management, Cilt No: 43, Sayfa: 1235-1248, 2002.
- [13] ROSEN, M.A. ve DINCER, I., "Exergoeconomic Analysis of Power Plants Operating on Various Fuels", Applied Thermal Engineering, Cilt No: 23, Sayfa: 643-658, 2003.
- [14] HEPBASLI, A. ve GUNERHAN, H., "A Study on the Utilisation of Geothermal Heat Pumps in Turkey", Proceedings of WGC 2000, Sayfa: 3433-3438, Japonya, 2000.
- [15] HEPBASLI, A. ve YILMAZ, H., "Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps in Turkey: Past, Present and Future", CD-Proceedings of 7th World Congress, CLIMA 2000, Napoli, İtalya, 2001.
- [16] HEPBASLI, A., ELTEZ, M. ve DURAN, H., "Current Status and Future Directions of Geothermal Heat Pumps in Turkey", Proceedings of Twenty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, USA, Sayfa: 398-405, 2001.
- [17] HEPBASLI, A., "Comparison of Three Experimental Studies on Geothermal Heat Pumps at the Turkish Universities", Proceedings of First International Conference on Sustainable Energy Technologies, Porto, Portekiz, 2002.
- [18] HEPBASLI, A., "Geothermal Heat Pumps", The Encyclopedia of Energy, Academic Press/Elsevier Inc, 2004 (Baskıda).
- [19] HEPBASLI, A., ELTEZ, A. ve HANCIOGLU, E., "A Feasibility Study on Geothermal Heat Pumps in Aegean Region of Turkey", Proceedings of 4th International Thermal Energy Congress (ITEC2001), İzmir, Sayfa: 44-48, 2001.
- [20] HEPBAŞLI, A. ve ERTÖZ, Ö., "Geleceğin Teknolojisi : Yeraltı Kaynaklı Isı Pompaları", TMMOB Makina Mühendisleri Odası IV. Tesisat Kongresi, MMO Yayın No.: 229/1, Cilt I, Sayfa: 443-492, İzmir, 1999.
- [21] HEPBAŞLI, A. ve HANCIOĞLU, E., "Jeotermal (Toprak Kaynaklı) Isı Pompalarının Tasarımı, Testi ve Fizibilitesi", 5.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Yayın No:E/2001/269-1, Sayfa: 331-382, İzmir, 2001.
- [22] HEPBASLI, A. ve HANCIOGLU, E., "Exergy Analysis of Ground-Source (Geothermal) Heat Pumps", Proceedings of ICEE_03 International Conference for Energy and Environment, 14-15 Ekim, Brack, Libya, 2003 (Sunulacak).
- [23] HEPBASLI, A., "Performance Evaluation of a Vertical Ground Source Heat Pump System in İzmir, Turkey", International Journal of Energy Research, Cilt No: 26(13), Sayfa:1121-1139, 2002.
- [24] HEPBASLI, A., AKDEMİR, O. ve HANCIOGLU, E., "Experimental Study of a Closed-Loop Vertical Ground-Source Heat Pump System", Energy Conversion and Management, Cilt No: 44(4), Sayfa: :527-548, 2003.
- [25] HEPBASLI, A. ve AKDEMİR, O., "Energy and Exergy Analysis of a Ground Source (Geothermal) Heat Pump System", Energy Conversion and Management, 2003 (Baskıda Makale).
- [26] YUMRUTAS, R., KUNDUZ, M. ve KANOGLU, M., "Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration Systems", Exergy- An International Journal, 2003.

ÖZGEÇMİŞLER

Leyla ÖZGENER

1975 yılı Denizli doğumludur. 1998 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. Bir müddet değişik özel kuruluşlarda Proje ve Satış Mühendisi olarak çalışmıştır. 2002 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (FBE) Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimini tamamlayarak, Yüksek Mühendis unvanını almıştır. Aynı yıl, Ege Üniversitesi FBE Güneş Enerjisi Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları (özellikle jeotermal enerji), ekserji analizi ve enerji yönetimi konularında çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk annesidir.

Arif HEPBAŞLI

1958 yılı İzmir doğumlu olup, halen Ege Üniversitesi (E.Ü) Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Yaşam felsefesi; üniversitede eğitim, araştırma ve sanayiye hizmet (olmazsa olmaz) üçgeninden oluşan işlerin dengeli olarak yürütülmesinden oluşmaktadır. 23 yıllık iş yaşamı olup, bunun yaklaşık ilk 6 yılı Üniversitede asistan, daha sonraki 10 yılı İzmir sanayisinde (DESA A.Ş., AKZO-KEMİPOL A.Ş ve SİMPLOT ve BEŞİKÇİOĞLU A.Ş) Proje Başmühendisliğinden Müdürlüğe kadar çeşitli pozisyonlarda, 1 yılı MMO İzmir Şubesi'nde Teknik Müşavir ve geri kalan 6 yılı ise, E.Ü'nde öğretim üyesi olarak çalışarak geçti/geçmektedir. 1999 yılında, Termodinamik Anabilim Dalı'nda Doçent oldu. 165'in üzerinde (45'i SCI kapsamında makale olmak üzere, 77 adedi uluslararası yayın) ulusal ve uluslararası bilimsel çalışmanın yazarı ve/veya ortak yazarıdır. "Sertifikalı Enerji Yöneticisi" olan Hepbaşlı'nın ilgi alanları; enerji verimliliği ve yönetimi, ısı sistemlerinin enerji ve ekserji analizleri, alternatif enerji kaynaklarının potansiyeli ve istatistiksel değerlendirilmesi, jeotermal enerji (özellikle jeotermal ısı pompaları)nın kullanımı, boru mühendisliği ve ısı tekniği uygulamalarıdır. Taylor & Francis, USA, tarafından yayınlanan "*Energy Sources (SCI-TÜBİTAK B-Tipi)*" ile ilki Ocak 2004'de çıkacak olan ve Marcel Dekker Inc., New York City, tarafından yayınlanacak, *International Journal of Green Energy*" dergilerin uluslararası yayın danışma kurulu üyesidir. Ayrıca, 2004 Mart'ında, Academic Press/Elsevier Inc. tarafından yayınlanacak olan "The Encyclopedia of Energy" nin "Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps" konulu bölüm yazarıdır. Evli ve bir kız babası olup, Almanca, İngilizce ve Japonca (Basic II düzeyinde) bilmektedir.