

Geri Dönüş Havalı İklimlendirme Sistemlerinde Enerji ve Ekserji Analizi

Ali GÜNGÖR¹, İbrahim KARAÇAYLI^{*2}, Erdoğan ŞİMŞEK³, Yücel CANLI²

¹Ege Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir

²Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi, İzmir

³Çukurova Üniversitesi, Adana Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 02.06.2017

Kabul tarihi: 25.09.2017

Öz

Termodinamiğin birinci yasası iklimlendirme sistemlerinin tasarımında sıkça kullanılan bir kuraldır. Enerji korunumu yasası olarak da bilinen bu yasa, bütün ısı sistemlerin analizinde tercih edilmektedir. Ancak ısı sistemlerin tasarımı, performans değerlendirilmesi ve optimizasyonu için ekserji analizi metodu, enerji analizi yaklaşımına nazaran daha doğru bir yöntemdir. Ekserji ya da kullanılabilirlik, belirli bir halde ve belirli bir miktardaki enerjinin elde edilmek istenen yararlı işe dönüşebilme potansiyelidir. Bu çalışmada, öncelikle, sürekli akışlı açık sistemler için enerji ve ekserji konusu genel hatlarıyla ele alınacaktır. Daha sonra, ısıtma modundaki geri dönüş havalı iklimlendirme santrali için enerji ve ekserji analizine yer verilmiştir. Böylece bu sistemde gerçekleşen enerji transferleriyle kullanılan enerjinin ne kadarının yararlı işe dönüştürülebileceği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji analizi, Ekserji, Ekserji analizi, Geri dönüş havalı iklimlendirme sistemi

Energy and Exergy Analysis in Recirculating Air Conditioning Systems

Abstract

The first law of thermodynamics is frequently used as a rule to design of the air conditioning systems. The first law of thermodynamics, that is also known as the conservation of energy principle, is preferred in analysis of all thermal systems. Nevertheless, exergy analysis method is a more useful procedure compared to energy analysis approach for the design, performance evaluation and optimization of thermal systems. Exergy or availability is the useful work potential of a given amount of energy at some specified state. In this study, firstly, subject of energy and exergy is examined in general terms for steady-flow open systems. Then, energy and exergy analysis procedures will be explained for recirculating central air conditioning in heating mode. Thus, the rate of energy transfer taking place in and how much energy is converted into the beneficial work in this system are investigated.

Keywords: Energy analysis, Exergy, Exergy analysis, Recirculating air conditioning system

*Sorumlu yazar (Corresponding author): İbrahim KARAÇAYLI, ibrahim.karacayli@ege.edu.tr

1. GİRİŞ

Isı pompaları, klima sistemleri, merkezi santraller gibi bütün ısı makinaların tasarımında termodinamiğin birinci yasası kullanılmaktadır. Ayrıca ısı sistemlerinin performansının değerlendirilmesinde, termodinamiğin birinci yasasının başka bir deyişle enerjinin korunumu ilkesinin uygulanması oldukça yaygındır [1]. Termodinamiğin birinci yasası veya kısaca birinci yasa, enerjinin değişik biçimleri arasında dönüşebileceğini ancak toplam enerjinin değişmeyeceğini ifade eder [1,2]. Enerjinin korunumu ilkesinin bir ifadesi olan bu yasa, enerjinin var veya yok edilemeyeceğini ancak bir biçimden diğerine dönüşebileceğini vurgular [2]. Enerji, genellikle iş ya da iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [3].

Isıl sistemlerin enerji analizi veya diğer adıyla birinci yasa analizi, sistem içindeki enerji transferleriyle enerjinin değişik biçimler arasındaki dönüşümünü nicelik olarak ortaya koymaktadır. Bu sistemlerin tasarımının yanı sıra ısı performanslarının değerlendirilmesinde de bu yöntem sıkça tercih edilmektedir [1]. Ancak enerji analizinde sistemin sahip olduğu enerjinin ne kadarının yararlı işe dönüşeceği hakkında bilgi vermez. Ayrıca birinci yasa analizi, enerji geçiş yönleri hakkında da bilgi vermez, hal değişimlerini sadece niteliksel olarak değerlendirir [2]. Bununla birlikte birinci yasa, hal değişimlerinin doğal yönüne ve hal değişiminin tersinmezliklerine bağlı olarak sistemlerin veriminin kuramsal sınırı hakkında bilgi vermez.

Termodinamiğin ikinci yasası, hal değişimlerinin veya enerji transferlerinin enerjinin niteliğinin azaldığı veya entropinin arttığı yönde kendiliğinden gerçekleşebileceğini savunur. İkinci yasanın kullanımı, sadece hal değişimlerinin yönünü belirlemekle sınırlı değildir. Termodinamiğin ikinci yasası, entropi üretimi ve atık enerjiye sebep olan tersinmezliklerle ilgilenir [4]. Enerjinin sadece niceliğiyle ilgilenen birinci yasanın aksine ikinci yasa, enerjinin hem niceliğiyle hem niteliğiyle ilgilenmektedir. İkinci yasa, enerjinin niteliğini ve bir hal değişimi

sırasında bu niteliğin nasıl azaldığını hesaplamak için somut yöntemler ortaya koyar.

Ekserji, termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına dayanır. Fakat enerji gibi bir biçimden diğerine dönüşmez [4]. Başka bir deyişle ekserji, belirli bir haldeki sistemde var olan enerjinin iş potansiyelidir. Diğer bir deyişle ekserji, sistemden elde edilebilecek en fazla yararlı iştir. Aynı şekilde enerji, hal değişimleri esnasında korunurken ekserji, hal değişimleri süresince tüketilmektedir [1,2,4]. Ekserji, iş yapan bir sistemin sahip olduğu enerjinin kullanılabilir enerji miktarını açığa çıkardığından ısı sistemlerinin analizi ve optimizasyonu için ekserji analizi, enerji analizine göre daha uygundur [4].

Bir sistemin enerjisinin işe dönüşebilme potansiyelini ifade eden ekserji, bir termodinamik sistemin çevresiyle olan sıcaklık farkının artmasıyla artar. Bir sistem, termodinamik dengeden uzaklaştıkça sistemin enerjisinin iş yapabilme potansiyeli artar, termodinamik dengede ise iş yapabilme potansiyeli sıfır olur [4]. İki hal değişimi arasında sistem tarafından yapılan en çok iş, hal değişiminin tersinir olması durumunda gerçekleşir. Bu nedenle sistemden elde edilebilecek en çok iş belirlenirken hal değişimindeki tersinmezlikler dikkate alınmaz [2].

Isıtma, soğutma ve havalandırma işlemleri çevre sıcaklıklarına yakın sıcaklıklarda gerçekleştiği için bu işlemler, düşük kaliteli enerji kaynaklarına ihtiyaç duyarlar. Ancak bu düşük kaliteli enerji ihtiyaçları, elektrik enerjisi gibi yüksek kaliteli enerji (yüksek ekserjili) kaynaklar ile karşılanır [4]. İklimlendirilen ortamlarda, ısıtma ve soğutma işleminin gerçekleştirilmesinde taze hava girişinin sağlanması için enerji taşıyıcı akışkan olarak kullanılan iç ortam şartlarındaki havanın bir kısmı dışarı atıldığından, enerjinin bir kısmı dışarı atılmaktadır [5]. Günümüzde ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde tüketilen enerjinin toplam enerji tüketimindeki payı, yaklaşık olarak %50 değerindedir [3]. Bu durum da enerjinin daha etkin ve verimli kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir [4]. Enerjinin verimli kullanılabilmesi için enerji analizinin yanı sıra ekserji analizlerine de ihtiyaç duyulmaktadır.

Isıtma, soğutma ve havalandırma ihtiyaçlarının karşılanması için tercih edilen bir yöntem de merkezi iklimlendirme santralleridir. Bu santraller, karışım odası, ısıtma, nemlendirme, soğutma ve nem alma ve son ısıtma ünitelerinden meydana gelir. Karışım odaları, iklimlendirilen ortamların taze hava ihtiyaçlarının karşılanması işleminin ekonomik geçmesine yardımcı olmaktadır. Kış sezonunda özgül nemi ve sıcaklığı düşük olan havanın hem ısıtılması hem de nemlendirilmesi, yazın ise özgül nemi ve sıcaklığı yüksek olan havanın soğutulması neminin uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle kış sezonunda ön ısıtma, nemlendirme ve son ısıtma üniteleri devrede iken yaz sezonunda ise sadece soğutma ünitesi çalıştırılmaktadır. Ön ısıtma işlemi, nemlendirme işlemine destek olmak için gerçekleştirilir. Çünkü sıcaklığı yükselen havanın nem alabilme kapasitesi artmaktadır. Son ısıtma işlemi ise mahale gönderilecek havanın istenilen sıcaklık şartına getirilmesi amacıyla kullanılır. Yaz sezonunda devreye alınan soğutma ünitesi, aynı zamanda özgül nemi yüksek olan havanın neminin alınmasına da yardımcı olmaktadır [2,6,7].

Bu çalışmada nemlendirme işlemi olarak buhar jeneratöründe elde edilen havanın kuru termometre sıcaklığından yüksek sıcaklığa sahip su buharı ile nemlendirme işlemi yapılmıştır. İklimlendirme santralinde yapılan deneyler esnasında soğutma ünitesi devre dışı bırakılarak ön ısıtıcı, buhar jeneratörü ve son ısıtıcı çalıştırılmıştır. Taze hava ihtiyacının karşılanması için mahalden dönen kullanılmış hava ile dış ortamdan çekilen düşük sıcaklıktaki taze hava, belli bir oranda karıştırılmıştır. Bu sistemdeki karışım odası, ön ısıtma ve nemlendirme ve son ısıtma hücreleri için enerji geçişleri ile akış ekserjileri hesaplanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde, ısı sistemlerinin ekserji analizleriyle ilgili çok fazla çalışmalar yer almaktadır. Bunlardan sadece birkaçına aşağıda değinilebilmiştir.

Bilgili ve arkadaşları [8], evsel tip bir split klimanın performansını farklı atmosfer hava sıcaklıklarına göre enerji ve ekserji analizi ile

değerlendirmek için bir deneysel düzenek hazırlamışlardır. Yaptıkları deneysel sistemde, elektrikli ısıtıcılar ile kondenser serpantini girişinde atmosfer hava sıcaklığı değerleri kademeli bir şekilde artırılmıştır. Böylece bu klima sisteminin soğutma etkinliğini (COP), tüm sistem ve her bir eleman için (kompresör, kondenser, kılcal boru ve evaporatör) entropi üretimini, ekserji yok oluşunu ve ekserji verimi değerlerini elde etmişlerdir.

Mosaffa ve arkadaşları [9], gizli ısı termal depolama ile buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin kombinasyonunu içeren iklimlendirme sisteminin ileri ekserji analizini yapmışlardır. Bu analizi ekserji yıkımının endojen veya ekzojen ve önlenemez veya önlenebilir kısımlarına bölünmesine dayandırmışlardır.

Özek [10], yüksek lisans tezi kapsamında, geri dönüş havalı konfor amaçlı iklimlendirme sisteminin laboratuvar şartlarında deneysel olarak enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Deneyleri, farklı dış hava, kuru termometre sıcaklıkları, dış hava ve dönüş havası, hacim debisi oranı ve dış havanın bağıl nemi için tekrarlamıştır. Geliştirdikleri bilgisayar programı yardımıyla soğutucu serpantin kapasitesi, yok olan ekserji ve ekserji verimi değerlerini hesaplayarak farklı sistem parametrelerine göre ısı transferinin değişim aralıklarını, soğutucu serpantinde yok olan ekserji miktarını ve ekserji veriminin alt ve üst limitlerini belirlemeyi amaçlamışlardır.

Yücer ve Hepbaşlı [11], ısıtma merkezindeki geleneksel kazan ve odada bulunan fan coil ünitesi ile bir eğitim binasının ısıtılmasının ekserjetik değerlendirmesini yapmışlardır. Isı kaybı hesapları enerji ve ekserji analizi yöntemiyle yapılmış ve enerji ve ekserji akımları, ön tasarım araçları kullanılarak optimize edilmiş bina tasarımı için elde edilmiştir. Enerji ve ekserji kayıpları, sistem performansını hesaplamak için belirlenmiştir.

Derbentli [12], son yıllarda ekserji alanında gerçekleştirilen çalışmaları gözden geçirerek yapılan çözümlenmeleri, uygulanan yöntemleri ve gelişmeleri değerlendirmiştir. İklimlendirme sistemlerinin tasarımında ve değerlendirmesinde

kullanılmaya başlan termoekonomi adı verilen bir bilim dalı geliştiğini vurgulamıştır.

Sakulpipatsin ve arkadaşları [13], bir bina ve iklimlendirme sisteminin ekserji çözümlenmesi için bir yöntem önermişlerdir. Yöntem, binanın ısı kazanç ve kayıplarını hesapladıktan sonra bu değerleri kullanarak ekserji giriş-çıkışlarını bulmakta ve ekserji bilançosunu yapmaktadır. Yöntem Hollanda'da bir ofis binasına uygulanmış, binanın soğutulması ve ısıtılması için ekserji verimleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çalışmada ayrıca binadan dışarı olan ekserji akışı ele alınmıştır. Bu yöntemle değişik ısıtma – soğutma sistemlerinin karşılaştırmasını yapmak ve bu yolla sistem optimizasyonuna gitmek mümkün görünmektedir.

Pu ve arkadaşları [14], kümülatif ekserji yaklaşımlarını iki farklı durum için iklimlendirme sistemlerini değerlendirmek için uygulamışlardır. İlk durumda, direkt gaz yakıtlı, hava ve su soğutmalı chiller ve ısı pompası ile havayı soğutan iklimlendirme sistemleri olmak üzere üç farklı iklimlendirme sistemini ele almışlardır. İkinci durumda ise santrifüjlü su soğutucu, vidalı su soğutucu, hava soğutmalı su soğutucu ve direkt gaz yakıtlı olmak üzere dört farklı iklimlendirme sistemini ele almışlardır.

Wei ve Zmeureanu [15], bir ofis binası için değişken hava debili (VAV) iklimlendirme sisteminin iki farklı çalışma koşulu için ekserji çözümlenmesini yapmışlardır. Sistemin tümü, elektrik enerjisi ile çalışmaktadır. Çalışmada, önce iklimlendirme sisteminin enerji ve ekserjiye dayalı matematiksel modelleri oluşturulmuş, yıllık bazda sistemin etkinlik katsayıları (COP) ve ekserji verimleri hesaplanmıştır. Elektrik yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması durumunda, ekserji veriminin artacağı vurgulanmıştır.

Chengqin, ve arkadaşları [16], nemli havanın ekserjisini veren bağıntıları yeniden ortaya koyduktan sonra, ekserjinin çevre haline (referans haline) göre değişimini incelemiştir; Wepfer, Gaggioli ve Obert' in sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Çalışmada, bir iklimlendirme sisteminin

elemanları sınıflandırılarak her bir grup için ekserji verimi ayrı ayrı tanımlanmıştır. Bu çalışmada, ayrıca ekserjinin ısı, mekanik ve kimyasal olarak üç bileşeni tanımlanmış ve değişik buharlaşmalı soğutma (evaporative cooling) yöntemlerinin ekserji çözümlenmesi yapılmıştır.

3. MATERYAL VE METOD

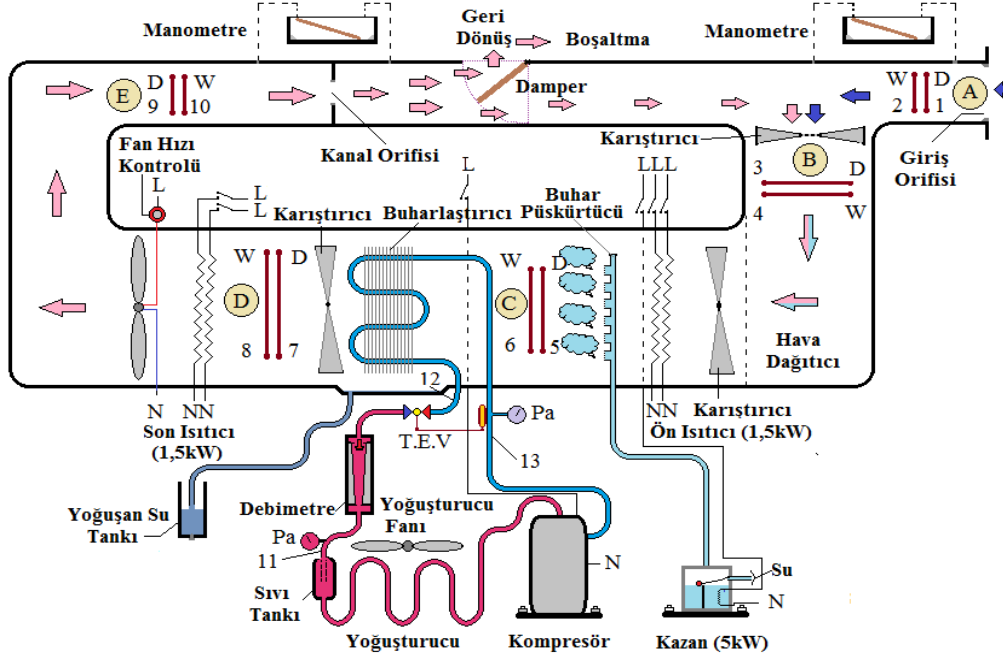
Bu çalışmada, enerji ve ekserji analizinin yapılması için ısıtma modunda çalışan geri dönüş havalı iklimlendirme sistemi kullanılmıştır (Şekil 1). Bu sistemde, dışarıdan alınan taze hava ile mahalden dönen kullanılmış hava karışım odasında adyabatik olarak karıştırılarak ön ısıtma işleminin yapılacağı bölüme gönderilir. Ön ısıtma işleminden sonra buhar jeneratöründe üretilen sıcak buhar ile nemlendirme işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra da hava mahale gönderilmek istenen sıcaklığa ulaşmaya kadar son ısıtma ünitesinde ısıtılır. Şekil 1'de deneysel verilerin toplandığı geri dönüş havalı iklimlendirme cihazı, şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 1'de gösterilen geri dönüş havalı iklimlendirme santraline dış ortam havası (taze hava) A noktasından gelir ve E noktasındaki mahalden dönen hava (kullanılmış hava) ile B noktasındaki karışım odasında belirli oranlarda karışır. Karışım odasından çıkan hava, B ile C arasında yer alan ön ısıtma ve nemlendirme hücresinden geçer. Daha sonra C ile D arasında soğutma ünitesi yer almaktadır. Hava, D ile E arasında bulunan son ısıtma ünitesinden geçerek istenilen şartlara getirilmiş olur. E noktasındaki hava mahale üflenen hava olup mahaldeki ısı ve nem kayıplarını karşılayacak özellikte olmalıdır.

3.1. Ekserji Analizi

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.

Soğutma ünitesinden elde edilen 1 kJ enerji ile 1 kJ elektrik enerjisi veren bir güç tesisinin verdikleri enerjilerin kullanılabilirliği, ekonomikliği



Şekil 1. Geri dönüş havallı iklimlendirme santrali

ve kalitesi aynı değildir. Ekserji, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar. Aynı zamanda Termodinamiğin 1. yasasının da anlaşılmasına yardımcı olur [3].

Bir sistemden elde edilebilecek en çok iş, sistem belirli bir başlangıç halinden, tersinir bir hal değişimiyle çevrenin bulunduğu hale (ölü hal) getirilirse elde edilir. Bu değer, sistemin verilen başlangıç halinde, yararlı iş potansiyelini veya iş yapma olanağını göstermektedir ve kullanılabilirlik diye adlandırılır. Kullanılabilirlik bir ısı makinesinin gerçek bir uygulamada yapabileceği iş değildir, bir sistemin termodinamiğin yasalarına ters düşmeden yapabileceği işin üst sınırıdır [2]. Verilen bir halde, sistemin enerjisinin kullanılabilirliği, sistemin özelliklerinin yanı sıra, çevre koşullarına, başka bir deyişle ölü hale bağlıdır [2].

3.2. Açık Sistemlerin Ekserjisi

Açık sistemlerde, sistem çevresiyle ısı, iş ve kütle etkileşiminde bulunur. Sürekli akışlı açık sistemlerde, madde akışının ekserjisi, akışın

olmadığı kapalı sistemin ekserjisiyle akış işi ile ilgili ekserjinin toplamına eşittir. Bu durumda madde akışının ekserjisi,

$$\dot{E}_{x_{akış}} = (H-H_0) - T_0(S-S_0) + \frac{mV^2}{2} + mgz \quad (1)$$

$$\text{veya } e_{x_{akış}} = (h-h_0) - T_0(s-s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada V , açık sistemin hızı; H , entalpi; S , entropi ve z referans düzlemiyle olan düşey yükseklik farkını ifade etmektedir. "o" alt indisi ise çevre ortam (ölü hal) özelliklerini belirtiyor.

T_0 sıcaklığındaki çevre ortamdaki Q ısıl enerjisinin ekserjisi;

$$\dot{E}_{x_Q} = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (3)$$

şeklinde hesaplanır. Sistemin sıcaklığı, çevre ortamın sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta olması durumunda, ekserji ve ısı transferi, aynı yönde olur. Fakat sistemin çevre ortamın

sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta olması durumunda ise ekserji ve ısı transferi, ters yönde olur.

Çevre ortamdaki daha düşük sıcaklıktaki sistemin ekserjisi, sistem sıcaklığı, çevre sıcaklığına yaklaştıkça sıfıra gider, çevre sıcaklığına eşit olunca da sıfır olur. Sonlu sıcaklık farkında, ısı geçişi, tersinmezdir ve entropi üretimine yol açar. Entropi üretimi de ekserjinin yok edilmesi anlamına gelir.

İşle birlikte gerçekleşen ekserji transferi, sistem tarafından yapılan veya sistem üzerinde yapılan yararlı işe eşittir. Bu nedenle, işle birlikte gerçekleşen ekserji geçişi, hal değişimi esnasında hacim değişikliği geçiren kapalı sistem dışında işin kendisine eşittir. Hareketli sınır işi olarak tanımlanan hacim değişikliğine yol açan hal değişimlerinde yapılan iş, atmosfer basıncını alt etmek için veya atmosfer basıncı tarafından yapılan iş olduğu için başka bir sisteme aktarılamaz ve başka bir amaç için kullanılamaz. Bu nedenle gerçek iş ile çevre işi arasındaki farka, yararlı iş denir.

$$\dot{E}_{xW} = W_y = W - P_o(V_2 - V_1) \quad (4)$$

şeklinde hesaplanır.

3.3. Termodinamik Denklik Bağlıları

Sistemlerin kütle, enerji, entropi ve ekserji gibi değerlerinin denge denklik ilişkileri en genel olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$(\text{Giren} + \text{Üretilen}) - (\text{Çıkan} - \text{Tüketilen}) = \text{Birikme} \quad (5)$$

Burada, giren ve çıkan terimleri, sırasıyla sistem sınırlarından sisteme giren ve sistemden ayrılan miktarı; üretilen ve tüketilen terimleri ise sırasıyla sistem sınırları içinde hal değişimi boyunca açığa çıkan veya harcanan miktarını ifade eder. Birikme terimi ise hal değişimi sonunda sistem sınırındaki miktar bazında değişimi ifade eder. Kütle ve enerji, hal değişimi boyunca üretilip tüketilemeyeceği için üretilen ve tüketilen terimleri, kütle ve enerji dengesi denkleminde yer almaz. Entropi için bu denklik yazılacak olursa hal

değişimi sırasında entropi üretilirken tüketilemeyeceği için “üretilen terimi” yer alır fakat “tüketilen terimi” yer almaz.

Ekserji için denklik yazıldığında ekserji üretilmediği için “üretilen terimi” yer almaz. Gerçek hal değişimleri için giren ekserji (\dot{E}_{xg}), çıkan ekserjiden ($\dot{E}_{xç}$) daima fazladır. Bu denksizlik, ekserji yok oluşu, hal değişimindeki tersinmezliklerden kaynaklanmaktadır. Tersinmezliklerin hiçbir ekserjisi yoktur ve bu yüzden, doğrudan hiçbir çevresel etkisi yoktur [3].

Korunum yasasına göre değişime uğrayan enerji, sadece form değiştirir. Buna karşın ne üretilebilir ne de tüketilebilir. Ekserji ise, hal değişimi boyunca tersinmezlikler nedeniyle sistem sınırları içinde tüketilir; ancak üretilemez ve bu nedenle korunamayan bir yasayla karşı karşıya kalır. Sonuç olarak genel ekserji dengesi birim zaman için aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\dot{E}_{xgiren} - \dot{E}_{xçikan} = \dot{E}_{xyok} \quad (6)$$

Burada $\dot{E}_{xgiren} - \dot{E}_{xçikan}$ ısı, iş ve kütle transferi ile net enerji geçişidir. \dot{E}_{xyok} olan ekserji yok oluşudur.

İkinci yasa verimi veya ekserji verimi, gerçek hal değişimlerinin tersinir hal değişimlerine ne kadar yaklaşıldığını belirtmek için kullanılır. Bu tanımlamaya göre bir hal değişiminin ekserji verimi, kullanılabilirliğin tümüyle yok edildiği durumda 0; kullanılabilirliğin tümüyle korunması durumunda 1 olacaktır [2]. En genel haliyle ekserji verimi ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\psi = \frac{\text{Sistemden elde edilen ekserji}}{\text{Sisteme sağlanan ekserji}} \quad (7)$$
$$\psi = 1 - \frac{\text{Yok edilen ekserji}}{\text{Sisteme sağlanan ekserji}}$$

Ekserji verimi hesaplanırken ilk olarak hal değişimi sırasında kullanılabilirliği (ekserjinin) veya iş yapma potansiyelinin ne kadarının tüketildiğini bulmak gerekir.

3.4. İklimlendirme Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi

İklimlendirme sistemlerinin analizinin dayandığı temel denklemler; (1) süreklilik denklemi (kütle dengesi), (2) termodinamiğin birinci yasası (enerji dengesi) ve (3) termodinamiğin ikinci yasası (ekserji dengesi)'dir.

İklimlendirme sistemlerinde kullanılan havanın kuru hava ve su buharı bileşenlerinden oluştuğu ve bu bileşenlerin ideal gaz gibi davrandığı kabul edilir. Daimi akışta kuru hava ve su buharının kütle dengeleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılır.

$$\sum_g (\dot{m}_h)_g = \sum_\varphi (\dot{m}_h)_\varphi \quad (8)$$

$$\text{ve} \quad \sum_g (\dot{m}_h \omega)_g = \sum_\varphi (\dot{m}_h \omega)_\varphi \quad (9)$$

Burada \dot{m}_h , \dot{m}_s ve ω sırasıyla kuru havanın su buharının kütle ve havanın özgül nemidir. g ve φ indisleri giren ve çıkan büyüklükleri ifade ediyor.

Enerji dengesi; kinetik, potansiyel enerji ve iş etkileşimi ihmal edilerek aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{Q}_{\text{giren}} + \sum_g (\dot{m} h)_g = \dot{Q}_{\text{çıkan}} + \sum_\varphi (\dot{m} h)_\varphi \quad (10)$$

T_o sıcaklığındaki çevre ortamla Q miktarda ısı transferinin gerçekleştiği sistem için ekserji dengesi; kinetik, potansiyel enerji ve iş etkileşimi ihmal edilerek aşağıdaki gibi yazılır.

$$\sum_g (\dot{E}_{xQ})_g + \sum_g (\dot{E}_x)_g - \sum_\varphi (\dot{E}_{xQ})_\varphi - \sum_\varphi (\dot{E}_x)_\varphi = \dot{E}_{x\text{yok olan}} \quad (11)$$

veya

$$\sum_g \left[Q \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) \right]_g + \sum_g [(h-h_o) - T_o(s-s_o)]_g - \sum_\varphi \left[Q \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) \right]_\varphi - \sum_\varphi [(h-h_o) - T_o(s-s_o)]_\varphi = \dot{E}_{x\text{yok olan}} \quad (12)$$

Kuru hava ve su buharı karışımı olan atmosfer havası, yaklaşık ideal gaz olarak davrandığı kabul edilerek 1 kg kuru havanın içinde bulunan nemin toplam akış ekserjisi, aşağıdaki eşitlikten bulunur [17].

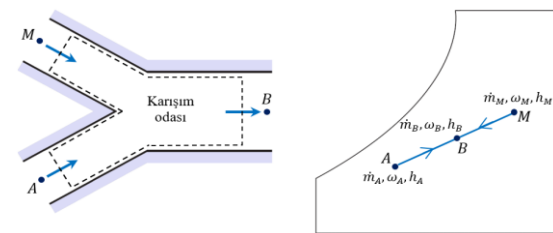
$$e_x = (c_{p,h} + \omega c_{p,s}) T_o \left(\frac{T}{T_o} - 1 - \ln \frac{T}{T_o} \right) + (1 + 1,608\omega) R_h T_o \ln \frac{P}{P_o} + R_h T_o \left[(1 + 1,608\omega) \ln \left(\frac{1 + 1,608\omega_o}{1 + 1,608\omega} \right) + 1,608\omega \ln \frac{\omega}{\omega_o} \right] \quad (13)$$

Burada $c_{p,h}$, $c_{p,s}$ sırasıyla kuru hava ve su buharının özgül ısısını; ω özgül nemini; R_h kuru havanın ideal gaz sabitini ve ω_o ise ölü halde bulunan havanın özgül nemini ifade ediyor.

4. PSİKROMETRİK İŞLEMLER İÇİN ÖRNEK ANALİZ

İklimlendirme işlemlerinden adyabatik karışma, ısıtma ve nemlendirme ve soğutma ve nem alma işlemleri ayrı ayrı incelenerek analizleri yapılacaktır. Yapılacak hesaplamalarda kuru havanın ideal gaz sabiti $R_h = 0,287$ kJ/kgK, özgül ısılar $c_{p,h} = 1,005$ kJ/kgK ve $c_{p,s} = 1,872$ kJ/kgK alınacaktır [18].

4.1. Adyabatik Karışma İşlemi



Şekil 2. Adyabatik karışma işleminin psikrometrik diyagramda gösterimi

Farklı özelliklerdeki en az iki havanın karıştırılarak yeni özelliklerdeki havanın elde edilmesi işlemi, karışma odasında gerçekleşir. İklimlendirme sistemlerinde, mahal içinde bulunan kullanılmış hava ile dış ortamdan alınan taze hava karıştırılarak koşullandırılıp mahale gönderilir.

Böylece dış hava kullanılarak mahalın havası tazelenir, mahal içindeki hava kullanılarak da enerji tasarrufu sağlanmış olunur. Şekil 2’de şematik olarak iki havanın karışım odasında adyabatik olarak karıştırılması ve bu işlemin psikometrik diyagramda çizimi verilmiştir.

Kuru havanın kütle dengesi (süreklilik denklemi):

$$\dot{m}_{h,A} + \dot{m}_{h,M} = \dot{m}_{h,B} \quad (14)$$

Su buharının kütle dengesi (süreklilik denklemi):

$$\omega_A \dot{m}_{h,A} + \omega_M \dot{m}_{h,M} = \omega_B (\dot{m}_{h,A} + \dot{m}_{h,M}) \quad (15)$$

Enerji dengesi (termodinamiğin birinci yasası):

$$\dot{m}_{h,A} h_A + \dot{m}_{h,M} h_M = \dot{m}_{h,B} h_B \quad (16)$$

Ekserji dengesi (termodinamiğin ikinci yasası):

$$\dot{E}_{X_A} + \dot{E}_{X_M} - \dot{E}_{X_B} = \dot{E}_{x_{yok\ olan}} \quad (17)$$

Enerji verimi (birinci yasa verimi):

$$\eta = \frac{\dot{m}_{h,B} h_B}{\dot{m}_{h,A} h_A + \dot{m}_{h,M} h_M} \quad (18)$$

Ekserji verimi (ikinci yasa verimi) [19]:

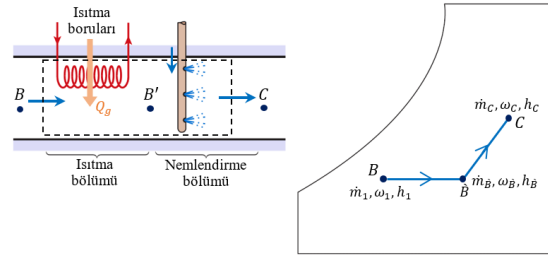
$$\psi = \frac{\dot{E}_{X_B}}{\dot{E}_{X_A} + \dot{E}_{X_M}} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_{yok\ olan}}}{\dot{E}_{X_A} + \dot{E}_{X_M}} \quad (19)$$

şeklinde hesaplanır.

4.2. Isıtma ve Nemlendirme İşlemi

Kış şartlarında özgül nemi ve sıcaklığı düşük olan dış havayı, konfor şartlarına getirmek için hem ısıtıp hem de nemlendirmek gerekmektedir. Isıtma işlemi, içinden elektrik akımı geçen direnç telleriyle yapılabileceği gibi, hava içinden sıcak akışkan geçirilerek de sağlanabilir. Burada ısıtma işlemi, havanın nem alabilme kapasitesinin arttırılması için gerçekleştirilir. Sıcak akışkan,

uygulamalarda farklı şekillerde sağlanmaktadır. Nemlendirme işleminde ise su veya su buharı ile nemlendirme yapılabilir. Şekil 3’te şematik olarak havanın ısıtıp nemlendirilmesi işlemi ve bu işlemin psikometrik diyagramda çizimi verilmiştir.



Şekil 3. Isıtma ve nemlendirme işleminin psikometrik diyagramda gösterimi

Kuru havanın kütle dengesi (süreklilik denklemi):

$$\dot{m}_{h,B} = \dot{m}_{h,C} = \dot{m}_h \quad (20)$$

Su buharının kütle dengesi (süreklilik denklemi):

$$\omega_B \dot{m}_h + \dot{m}_w = \omega_C \dot{m}_h \quad (21)$$

Enerji dengesi (termodinamiğin birinci yasası):

$$Q_g + \dot{m}_h h_B + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_h h_C \quad (22)$$

Ekserji dengesi (termodinamiğin ikinci yasası):

$$Q_g \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + \dot{E}_{X_B} + \dot{E}_{X_w} - \dot{E}_{X_C} = \dot{E}_{x_{yok\ olan}} \quad (23)$$

Enerji verimi (birinci yasa verimi):

$$\eta = \frac{\dot{m}_h h_C}{Q_g + \dot{m}_h h_B + \dot{m}_w h_w} \quad (24)$$

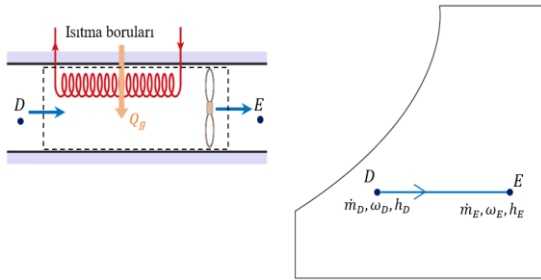
Ekserji verimi (ikinci yasa verimi) [19]:

$$\psi = \frac{\dot{E}_{X_C}}{Q_g \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + \dot{E}_{X_B} + \dot{E}_{X_w}} \quad (25)$$

şeklinde hesaplanır.

4.3. Son Isıtma İşlemi

İklimlendirme santrallerinde, mahaldeki ısı kaybını karşılamak için mahale üflenen havayı istenen sıcaklığına ulaştırmak için yapılan ısıtma işlemidir. Şekil 4'te şematik olarak havanın son ısıtma işlemi ve bu işlemin psikometrik diyagramda çizimi verilmiştir.



Şekil 4. Son ısıtma işleminin psikometrik diyagramda gösterimi

Kuru havanın kütle dengesi (süreklilik denklemi):

$$\dot{m}_{h,D} = \dot{m}_{h,E} = \dot{m}_h \quad (26)$$

Su buharının kütle dengesi (süreklilik denklemi):

$$\omega_D \dot{m}_h = \omega_E \dot{m}_h \rightarrow \omega_D = \omega_E = \omega \quad (27)$$

Enerji dengesi (termodinamiğin birinci yasası):

$$Q_g + \dot{m}_h h_D = \dot{m}_h h_E \quad (28)$$

Ekserji dengesi (termodinamiğin ikinci yasası):

$$Q_g \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + \dot{E}x_D - \dot{E}x_E = \dot{E}x_{\text{yok olan}} \quad (29)$$

Enerji verimi (birinci yasa verimi):

$$\eta = \frac{\dot{m}_h h_E}{Q_g + \dot{m}_h h_D} \quad (30)$$

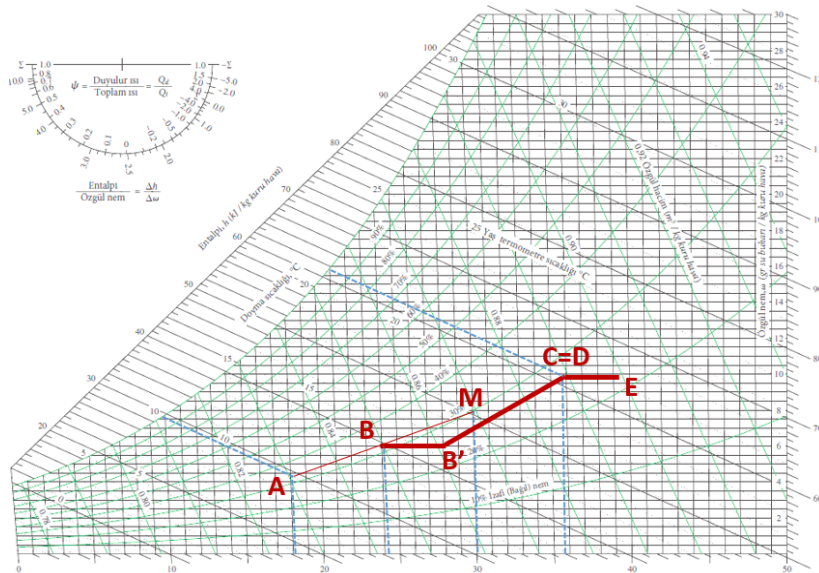
Ekserji verimi (ikinci yasa verimi) [19]:

$$\psi = \frac{\dot{E}x_E}{Q_g \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + \dot{E}x_D} \quad (31)$$

şeklinde hesaplanır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Laboratuvar ortamındaki mahalin sıcaklığı 30°C ve %30 izafi nem değerinde sabit tutulmak isteniyor. Bu şartların sağlanması için gerçekleştirilecek iklimlendirme işleminin psikometrik diyagramda çizimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Geri dönüş havalı iklimlendirme santrali

Karışım havası kullanılarak ısıtılan mahalde elde edilmek istenen (M noktası) şartlar ile iklimlendirme santralının karışım odasındaki karışım havasının (B noktası), ısıtma ve nemlendirme çıkışındaki havanın (C noktası) ve son ısıtma çıkışındaki mahale üflenen havanın (E noktası) kuru ve yaş termometre sıcaklıkları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Isıtma amacıyla çalışan klima santralinde kaydedilen karışım, ısıtma, nemlendirme ve son ısıtma işlemleri sonrasındaki hava sıcaklıkları

| | Kuru | Yaş |
|-----------|---------------------------------|------|
| | Termometre Sıcaklıkları (°C) | |
| Dış Ortam | 18,1 | 9,7 |
| İç Ortam | 30,0 | 18,0 |
| B noktası | 24,3 | 14,3 |
| C noktası | 35,8 | 21,3 |
| E noktası | 39,2 | 22,3 |

%48 taze haval ı klima santralinde mahale üflenen hava debisi 0,245 kg/s’dir. Bu santral Çizelge 2’de belirtilen şartlarda ısıtma modunda çalıştırılmıştır.

Çizelge 2. Ger i dönüş haval ı iklimlendirme santralinin çalışma koşulları

| | Anma Gücü (kW) | Akım (A) | Voltaj (V) |
|------------------|----------------|----------|------------|
| Ön ısıtıcı | 1,0 | 4,8 | 220 |
| Buhar Jeneratörü | 1,0 | 4,4 | 220 |
| Son Isıtıcı | 0,5 | 2,4 | 220 |
| Fan Motoru | – | 0,7 | 220 |

Ön ısıtıcıda ısıtıcı serpantin 1,056 kW değerinde ısı verdiğinde havadaki entalpi değişimi 0,85 kW değerinde olmaktadır. Son ısıtma işlemi sırasında ısıtıcı serpantininden aktarılan enerji 0,528 kW ve fan motorunun havaya aktardığı enerji 0,154 kW’tır. Mahale üflenen havaya hem son ısıtıcı serpantinlerinden hem de fan motorundan ısı

transferi gerçekleştiği için bu iki değerin toplamı alınmalıdır, böylece son ısıtma işleminden sonra gerçekleşen toplam ısı transferi 0,682 kW olarak bulunmuştur. Bu bölümde havadaki entalpi değişimi ise 0,855 kW olarak hesaplanmıştır.

Karışım odasındaki karışma işlemi adyabatik kabul edildiğinden ve bu işlem için ısı alış verişi olmadığından enerji geçişi 0 kW olarak alınmıştır.

Mahal havasından geri dönen dönüş havasının ekserjisi 232,03 W, karışım havasının ekserjisi 30,38 W, ön ısıtma ve nemlendirme işlemi sonunda ekserjisi 227,37 W ve son ısıtma işleminde ise ekserji 280,65 W’a yükselmiştir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, bir iklimlendirme sisteminin tasarımının yalnızca enerjinin korunumu, sistemdeki enerji değişimi ve enerji geçişinin gerçekleşme analizlerine dayandırılmaması gerekliliği vurgulanmaktadır. Sistemin optimizasyonu, mutlaka ekserji analizinin yapılmasının enerjinin etkin bir şekilde kullanılması açısından zorunlu olduğu gösterilmiştir.

Kullanılan iklimlendirme sisteminin enerji ve özellikle ekserji analizini yapabilmek için bu konudaki yayınlar incelenmiştir. Bunun yanı sıra sürekli akışlı, durgun ve açık sistemler için termodinamiğin birinci yasası ve termodinamiğin ikinci yasasına göre analizlerin nasıl yapıldığı detaylı olarak gösterilmiştir. Daha sonra da havanın kuru termometre sıcaklığından daha yüksek sıcaklıktaki buhar ile nemlendirme işleminin yer aldığı ısıtma amaçlı çalıştırılan iklimlendirme sistemi için enerji ve ekserji denklemleri uygulanmıştır.

Yapılan ekserji analizine göre şartlandırılan havanın sıcaklığı yükseldikçe, dış ortam havasıyla olan sıcaklık farkı arttığı için ekserji değeri artmaktadır. Böylece dış çevre şartlarına yakın sıcaklıklarda ısıtma yapılan iklimlendirme sistemlerinin düşük kaliteli enerjiye ihtiyaç duyduğu ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra faydalı

enerjinin nerelerde ve nasıl kullanıldığı tespit edilmiştir.

7. KAYNAKLAR

1. Karaçaylı, İ., Güngör A., Canlı, Y., 2016. İklimlendirme Sistemlerinde Ekserji Analizi ve Örnek Bir Uygulama, 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), Adana.
2. Çengel, Y.A., Boles, M.A., 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Türkiye, İstanbul: Literatür Yayıncılık.
3. Özgener, L., Hepbaşlı, A., 2013. HVAC Sistemlerinde Ekserji Analizinin Gerekliliği ve Uygulamaları, VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir.
4. Razmara, M., Maasoumy, M., Shahbakhti, M., Robinett III, R.D., 2015. Optimal Exergy Control of Building HVAC System, Applied Energy, 555-564.
5. Yelmen, B., Öztekin, S., Çakır, T.M., İklimlendirmede Enerji Tasarrufu Tedbirleri, Makine Mühendisleri Odası, İzmir.
6. Karaçaylı, İ., 2016. Bireysel İklimlendirme Sistemleri, Derleme Ders Notu, İzmir.
7. Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Çoşkun, S., Kaynaklı, Ö., Yamankaradeniz, N., 2008. İklimlendirme Esasları ve Uygulamaları, Bursa: Dora Yayıncılık.
8. Bilgili, M., Şimşek, E., Karaçaylı, İ., 2016. Bir Split Klimanın Farklı Atmosfer Hava Sıcaklıklarında Enerji ve Ekserji Analizi, 1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, Afyonkarahisar.
9. Mosaffa, A., Garousi Farshi, L., Infante Ferreira, C., Rosen, M., 2014. Advanced Exergy Analysis of an Air Conditioning System Incorporating Thermal Energy Storage, Energy, cilt: 77, 945-952.
10. Özek, E., 2013. Tekrar Dolaşımli İklimlendirme Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi, Çorum: Yüksek Lisans Tezi.
11. Yücer, C.T., Hepbaşlı, A., 2011. Thermodynamic Analysis of a Building using Exergy Analysis Method, Energy and Buildings, cilt 43, no. 2-3, 536-542.
12. Derbentli, T., 2011. İklimlendirme Sistemlerinde Ekserji Çözümlemesi, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir.
13. Sakulpipatsin, P., Itard, L.C.M., van der Kooi, H.J., Boelman E.C., Luscuere, P.G., 2010. An Exergy Application for Analysis of Buildings and HVAC Systems, Energy and Buildings, cilt 42, no. 1, 90-99.
14. Pu, J., Liu, G., Feng, X., 2010. Application of the Cumulative Exergy Approach to Different Air Conditioning Systems, Energy and Buildings, cilt: 42, 1999-2004.
15. Wei, Z., Zmeureanu, R., 2009. Exergy Analysis of Variable Air Volume Systems for an Office Building, Energy Conversion and Management, cilt: 50, no. 2, 387-392.
16. Chengqin, R., Nianping, L., Guangfa, T., 2002. Principles of Exergy Analysis in HVAC and Evaluation of Evaporative Cooling Schemes, Building and Environment, cilt: 37, no. 11, 1045-1055.
17. Hepbaşlı, A., 2003. Ekserji Ders Notları, İzmir: Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
18. Qureshi, B.A., Zubair, S.M., 2003. Application of Exergy Analysis to Various Psychrometric Processes, International Journal of Energy Research, no. 27, 1079-1094.
19. Dincer, İ., Rosen, M.A., 2015. Exergy Analysis of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning, USA: Elsevier Inc.

