

BİNALARIN HAVALANDIRILMASINDA ISI GERİ KAZANIM CİHAZLARININ EKSERJİK PERFORMANSI

Exergetic Performance of Energy Recovery Ventilation Systems in Buildings

Birol KILKIŞ

ÖZET

İç hava kalitesinin sürekliliği için gereken dış taze havanın ön ısıtması (kışın) veya ön soğutması (yazın) amacı ile kullanılan havadan-havaya hissedilir ısı geri kazanım cihazlarının performans ve ekonomi değerlendirilmeleri, ASHRAE el kitabı da dahil olmak üzere, sadece Termodinamiğin Birinci Yasası ile sınırlı tutulmaktadır [1]. Halbuki ısı geri kazanım cihazlarının gerektirdiği fan gücünün birim ekserjisi (elektrik) ile ön ısıtma veya soğutma ile kazanılan birim ısı güç ekserjisi arasında önemli farklar bulunmaktadır. Bu fark genelde mevcut cihazlarda eksi net ekserji kazancına, dolayısı ile ekserji yıkımlarına ve dolaylı olarak da ek CO₂ salımlarına yol açmaktadır. Bu makalede mevcut ısı geri kazanım cihazlarının Termodinamiğin İkinci Yasası çerçevesinde gerçek performansları ve çevresel etkileri göz önünde tutularak çıkarımlar sunulmakta ve yeni performans metrikleri sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ekserji Tabanlı COP, Isı Geri Kazanım Cihazı, Gömülü enerji ve Ekserji, Önlenebilir CO₂ salımları, ekserji

ABSTRACT

Performance and economy evaluation of air-to air sensible preheating equipment in winter or precooling in summer by energy recovering ventilation (ERV) equipment for a sustained indoor air quality has been a subject matter of the First-Law of Thermodynamics only, including the ASHRAE Handbook [1]. This approach ignores the large difference between the unit exergies of electricity and heat. This difference results in negative added value in the energy budget at large due to substantial exergy destructions in the sector and further results in additional CO₂ emissions, which are avoidable. This paper presents new conclusions derived from the view of Second-Law of Thermodynamics by new exergy-based metrics.

Keywords: Exergy-based COP, Energy Recovery Ventilation (ERV), Embodied Energy and Exergy, Avoidable CO₂ emissions, exergy

1. GİRİŞ

Özellikle yeşil binalarda ısı geri kazanımlı (Isıtmada) ve ısı geri atımlı (Soğutmada) havalandırma sistemleri giderek rağbet görmekte ve yüksek COP değerlerine ulaşan sürdürülebilir sistemler olarak tanımlanmaktadır. Ancak bu ısı değişimi ve enerji kazanımı sürecinde gerekli hava dolaşımını gerçekleştiren fan ve motor sistemlerinin gereksinim duyduğu elektrik gücünün birim ekserjisi, ϵ_E yaklaşık 1 WW olmasına karşın geri kazanılan veya atılan ısıdan kazanılan birim ısı güç ekserjisi, ϵ_H arasındaki büyük fark hesaplarda göz ardı edilmektedir. Çizelge 1 de örneklenen bir ısı geri kazanım cihazının Termodinamiğin Birinci Yasa uyarınca performans değerleri verilmektedir.

Çizelge 1. Isı Geri Kazanımlı Havalandırma Cihazı Örnek Verileri [2].

 $T_o: 283\text{K}, T_{ref}: 273\text{K}, T_R: 290.8\text{ K}, E_{XH} = (1 - T_o/T_R) \cdot Q$

Performans Değerleri		Model		
		1	2	3
1	Debi, $V\text{ m}^3/\text{h}$	3000	4000	5000
2	1 ci Yasa Verimi	0.65	0.51	0.46
3	T_R , K	290.8	289.1	288.5
4	Q , kW	7.86	8.20	9.24
5	E_{XH} , kW	0.21	0.173	0.176
6	ΔE_{XE} , kW	2 x 0.45	2 x 0.55	2 x 0.55
7	1. Yasa $COP : Q/\Delta E$	8.73	7.45	8.4
8	2. Yasa $COPEX : E_{XH}/\Delta E_{XE}$	0.23	0.157	0.16

Bu çizelgenin 1, 2 ve 3 numaralı satırlarındaki değerler doğrudan imalatçı kataloğundan alınmıştır. Takip eden satır değerleri ise aşağıdaki eşitlikler kullanılarak bulunmuştur [3, 4]:

$$Q = V \rho C_p (T_R - T_o) \quad (1)$$

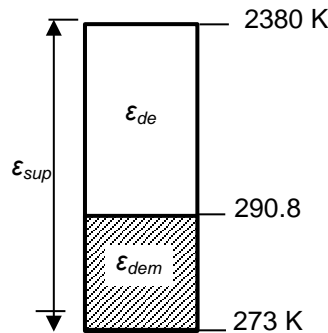
$$\Delta E_{XH} = \left(1 - \frac{T_o}{T_R}\right) \cdot Q \quad , \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q}{\Delta E} \quad , \quad \text{ve} \quad (3)$$

$$COPEX = \frac{E_{XH}}{E_{XE}} = COP \cdot \left(1 - \frac{T_o}{T_R}\right) \quad . \quad (4)$$

Elektrik gücünün birim ekserjisi, ε_E 1 W/W alındığında ΔE_{XE} ve ΔE eşit olmaktadır. Sonuçlardan COP değerinin 8 gibi oldukça yüksek olmasına karşın ekserji tabanında herhangi bir kazanım olmadığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, 1. Yasaya göre çok verimli gözükse de bu cihaz örneği 2. Yasaya göre akılcı değildir ($COPEX < 1$). Çok fazla birim ekserji yıkımı vardır (ε_{des}). Doğal olarak ekserji kazanımı olmayacağı bir gerçek olsa da ekserji yıkımı çok fazladır. Örneğin 3000 m^3/h debide $COPEX$ sadece 0.23 tür. Şekil 1 de REMM Modeli ile hazırlanan *Ekserji Akış Çubuğu* ısı geri kazanımının akılcı ekserji yönetim verimi, ψ_R değerinin sadece 0.069 olduğunu göstermektedir [2].

$$\psi_R = \frac{\varepsilon_{dem}}{\varepsilon_{sup}} = \frac{\left(1 - \frac{273}{290.8}\right)}{\left(1 - \frac{273}{2380}\right)} = 0.069 \quad (5)$$



Şekil 1. Isı Geri Kazanımının Örnek Ekserji Akış Çubuğu [2, 3].

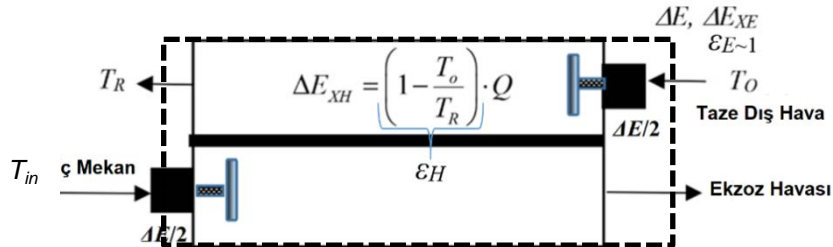
Buna karşın AB stratejilerinde havalandırmada ısı geri kazanımı öncelikli bir yer tutmaktadır. Bunun nedeni 2. Yasayı göz ardı etmeleridir [3]. Akılcı Ekserji Yönetim Verimi aslen önlenemez ΔCO_2 salımlarından da sorumludur ve sürecin yani ısı geri kazanımının özelliği bakımından geliştirilebilir pratik olarak önemli bir gelişim sağlamaz. Bunun nedeni geri kazanım sıcaklıkları (Şekil 2) çevresel koşullara ve iç konfor gereksinimlerine bağlıdır ve istenildiği gibi değiştirilemez.

$$\Delta CO_2 \propto (1 - \psi_R) \quad (6)$$

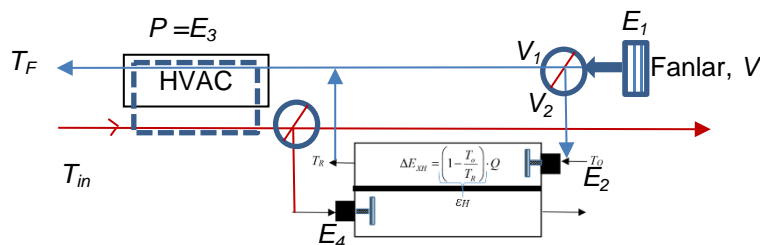
Sürecin geliştirilmesi ancak *COPEX* değerinin mümkün olduğunca (1) sayısına yaklaştırılması ile mümkün olur. Bu yaklaşım da Eşitlik 4 uyarınca pratik uygulamalarda ancak *COP* tesir katsayısının daha da artırılmasına bağlıdır ki bu da havadan-havaya ısı değiştiricilerinin veriminin artırılmasına, fan ve motor güç taleplerinin azaltılmasına ve verimlerinin yükseltilmesine bağlıdır. Bu önlemler de kısıtlı olduğundan ve *COPEX* değeri her zaman (1) sayısından az olacağından, sistem her zaman ekserji yılmaktadır ve katma değeri bulunmamaktadır. Ancak 1. Yasa uyarınca yapılan hesaplarda bu sorun gözükmemekte ve uygulamada geniş talep bulunmaktadır. Uygulayıcı açısından ekonomik ve yakıt tasarruflu bu sistem Ülke katma değeri yönünden zarardadır, hele elektriğin termik santrallerden düşük verimle gelmesi de hatırlandığında. Ancak tasarımcılar olarak bu zararın en aza indirgenmesi sistemin sadece akılcı olabileceği sıcaklık ve hava debisi koşullarında çalışmasını, kısmen veya hiç çalışmamasını gözetilen bir ekserji tabanlı otomasyon sistemi kullanılabilir, hatta artı katma değer kazanımı gerçekleştirilebilir.

2. MODEL

Sistem, önce havadan-havaya ısı değiştirgeci olarak modellenmiş (Şekil 2) sonra da ana klima santrali veya iç konforu sağlayacak sıcaklık tepelemesi yapacak cihaz modeline tümleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Havadan-Havaya Isı Değiştiricide Ekserji Tanımlaması [2].



Şekil 3. Tüm Sistem Modeli.

Şekil 3 emiş, ısı değiştirici ve egzoz fanları, klima santrali elektrik talepleri toplam elektrik talebini göstermektedir.

$$\Delta E = \Delta E_{XE} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (7)$$

Şekil ısı geri kazanım cihazı büyüdükçe HVAC sisteminin küçüleceğini ve ΔE değerinin de buna göre değişeceğini. HVAC sistemi daha güç-yoğun olduğu için ilk yatırım ve gömülü enerji, ekserji açılarından da ekonomik ve çevresel çözümler gerekebilir [4].

Bu modelde en uygun çözüm için dışarıdan taze havanın bir kısmının ısı geri kazanım cihazından geçirilerek öncelikle bu cihazın eniyilemesine imkân tanınmaktadır. Bu amaçla aşağıdaki eniyileme fonksiyonu geliştirilmiştir. Bu eşitlikteki son terim, eğer fan motorları değiştirici içerisinde ise (Şekil 3, kesikli çizgi) motor ısısının ekserjik anlamda ısı geri kazanımına ek katkı (artı değer) veya soğutma ısı geri atımında ek bir eksi değer olarak göz önünde tutulan bir terimdir. $f(V_2)$ ısı değiştiriciden geçen hava debisine bağlı bir zorlamalı ısı taşınım ve ışınlam toplam katsayısını simgelemektedir. Motor yüzey sıcaklığı T_m olan bir koşulda kazanılan ekserji bu son terimde görülmektedir. Egzoz motor ısısının ise herhangi bir etkisi yoktur. Aynı eşitliğin ikinci terimi ise tüm fan ve motorların ve HVAC sisteminin talep ettiği toplam elektrik ekserjisidir ve bunun kazanımdan çıkarılması gerekir. Bu terimdeki P ısı değiştiricideki basınç kaybıdır. P_{HVAC} ise HVAC sisteminin güç talebidir. T_F konfor için üfleme sıcaklığıdır

$$OF = \rho V_2 C_p (T_R - T_o) \left(1 - \frac{T_o}{T_R}\right) - \left[\frac{c V_2 P \times 1}{(\eta_F \eta_{bm})} + P_{HVAC} \right] - \rho V_1 C_p (T_F - T_o) \left(1 - \frac{T_o}{T_F}\right) \pm f(V_2) \left|1 - \frac{T_o}{T_m}\right| \quad (8)$$

Amaç fonksiyonun boyutsuz olarak COPEX cinsinden yazılması daha anlamlıdır:

$$COPEX = \frac{OF}{\Delta E} \quad \{COPEX \rightarrow 1\} \quad (9)$$

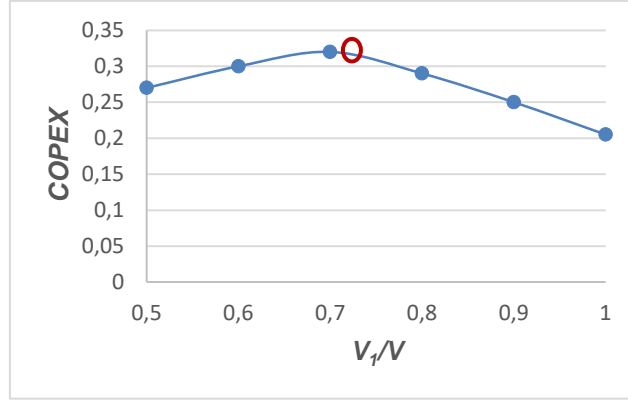
3. ALGORİTMA

Eşitlik 9 COPEX değerini 1 sayısına yaklaştırmayı amaçlamaktadır. Buradaki tüm değişkenler V_1 ve V_2 ye bağlı olduklarından tek değişken dışarıdan alınması gereken taze hava debisinin V_1 ve V_2 ye optimum bir şekilde dinamik koşullar çerçevesinde sürekli denetlenerek paylaşılmasıdır. Bu otomasyona ısı geri kazanım devresini veya HVAC cihazını kapatmak da dahildir (V_2 veya $V_1 = 0$) ve tüm süreç 9 Eşitliğini en üst düzeyde tutacak motorlu bir hava yönlendirici damper sistemi ile gerçekleştirilir. Sıcaklıklar ve hissedilir konfor yükleri hesaplanır ve veya ölçülür ve yukardaki eşitlikten iç hava kalitesinin anlık taze hava ihtiyacına göre (V) emiş fanları çalışır, en uygun V_1/V oranı hesaplanır ve akış yönlendirici damperlere komut verilir.

$$V_1 + V_2 = V \quad (10)$$

4. ÖRNEK ÇÖZÜMLEME

Belli bir kapasiteye sahip bir klima santraline (500 kW ısıtma) paralel olarak bir ısı geri kazanım cihazı konulmuştur. Dış hava sıcaklığının 0°C (273K) olduğu bir anda COP 3 değerindedir. Isı geri kazanım cihazının bu çevresel koşullardaki ısı veriminin havayı ne kadar ısıtacağı (T_R) ısının klima santraline gidecek havanın ne kadarının ısı değişim cihazından geçeceğine ağıldır ki bu da zaten optimizasyon değişkenidir. T_F ise iç hava sıcaklığı (T_{in}) 22°C ın 5°C üzerinde alınmıştır. Eşitlik 8 ve 9 kullanılarak V_1/V oranı incelenmiştir. Örnek sonuçları Şekil 4 göstermektedir.



Şekil 4. V₁/V Oranı ile COPEX Değişimi.

V₁/V değerinin 1 olduğu nokta ısı geri kazanım cihazının olmadığı koşuldur. Bu koşulda COPEX değeri 0.2 dir. COPEX bu örneklemedeki değişim eğilimi içerisinde en yüksek değerine 0.7 noktasında ulaşmaktadır (0.32). Bunun pratik anlamı CO₂ salımlarında oransal olarak %36 kadar bir azaltım demektir. Bu sonuç aşağıdaki eşitlikten [5] sağlanmış olup her iki koşulda akılcı ekserji yönetim verimi ψ_R ve ε_{sup} sabittir.

$$CO_2 = \left(\frac{c}{\eta_T} \right) \frac{\psi_R \varepsilon_{sup}}{COPEX} = 0.57 \frac{\psi_R \varepsilon_{sup}}{COPEX} \quad (11)$$

$$\frac{(CO_2)_{V_1/V=0.7}}{(CO_2)_{V_1/V=1}} = \frac{COPEX_{V_1/V=1}}{COPEX_{V_1/V=0.7}} = \frac{0.205}{0.32} = 0.64$$

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Enerjinin niceliği yanı sıra niteliğinin de (Ekserji) olduğu ve arz ve talep arasındaki dengede sadece enerji niceliğinin değil niteliğinin de önemli hatta daha önemli olduğunun bu çalışma bir kes daha göstermiştir. Nitelik dengesizlikleri ek CO₂ salımlarına neden olmaktadır ve bu nitelik kayıplarının (Ekserji yıkım) geri dönüş imkânı bulunmamaktadır [6]. Bu kapsamda REMM Modeli geliştirilmiş olup bu makalede yer alan 5 sayılı eşitlik bu Modelin bir ürünüdür. Tüm sektörlerdeki cihaz ve sistemlerde Akılcı Ekserji Verimi, ψ_R nin ve buna bağlı olarak COPEX katsayısının 1 değerine yakınsaması gerekmektedir. Tüm bu gereklere karşın, ASHRAE standardı olsun, TSE Standardı olsun, ısı geri kazanım cihazlarına ilişkin deney ve değerlendirme standartlarının hepsi Termodinamiğin 1. Yasasını esas alır [7, 8]. Bu yaklaşımın yetersiz olduğu, aslında bu cihazların katma değer ve çevre bağlamında katkı koyamadıkları bu çalışmada gösterilmiştir. O halde amaç ekserji yıkımlarının dolayısı ile çevresel zararların en aza indirgenmesi için çalışılmalıdır. Aslında ekonomik anlamda bile yarar sağlanmadığı başka araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir [9]. Bu yöndeki bulgular ışığı altında yakın geleceğin Enerji-Esnek yapılarında ısı geri kazanım cihazlarının yeri ciddi biçimde sorgulanmalıdır [10]. Bununla birlikte COPEX değerinin 1 e yakın bir noktaya odaklanması durumunda önerilen modeldeki sistem dikkate alınmalıdır. Bu durumda HVAC biriminin daha çok gömülü enerji ve ekserji, malzeme, fazla sayıda ekipman, dolayısı ile daha çok elektrik enerji tüketimi (Kompresör gibi) gibi nedenlerle COPEX değerinin daha düşük [6], buna karşın ısı geri kazanım sisteminin ekonomik anlamda (1. Yasa) kendini öder durumda olduğu unutulmamalıdır.



SİMGELER

E	Elektrik gücü, kW
c	Isı Geri Kazanım Eşanjöründe Basınç Kaybının Ekserjisi Terimindeki Sabit Katsayı
C_P	Özgül Isı, kJ/kg·K
COP	Tesir Katsayısı
$COPEX$	Ekserji Tabanlı Tesir Katsayısı
E_X	Ekserji, kW
OF	Amaç Fonksiyonu
Q	Isıl Güç, kW
P	Basınç Kaybı, Pa
T	Sıcaklık, K
V	Debi, m ³ /h

Semboller

ψ_R	Akılcı Ekserji Yönetim Verimi
ε	Birim Ekserji, W/W
$\Delta E (P_{HVAC})$	Klima ve ön Isıtma/Soğutma için Sarf Edilen Güç, kW
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
ΔCO_2	Önlenebilir CO ₂ Salımı, kg CO ₂ /kW-h

Alt Simgeler

dem	Talep
des	Yıkım
E	Elektrik
H	Isı
in	Kapalı Ortam
F	Üfleme
m	Elektrik Motoru Yüzeyi
o	Dış ortam (Hava)
R	Isı Geri Kazanımından Çıkış
ref	Referans (Çevre)
sup	Arz

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği (EU)
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
HVAC	Isıtma, Klima ve Havalandırma (Heating, Ventilating, and Air-Conditioning)
REMM	Rational Exergy Management Model [5]
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

KAYNAKÇA

- [1] ASHRAE. 2016. ASHRAE Handbook- HVAC Systems and Equipment, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, Chapter 26, p 26.2.
- [2] Kilkis, B. 2019. Sensible Heat Recovery in Ventilation, How Rational is it? *ASHRAE J.*, March Issue, 2019.
- [3] TTMD. 2017. Sustainability and Decarbonization Efforts of the EU: Potential Benefits of Joining Energy Quality (Exergy) and Energy Quantity (Energy) in EU Directives, A State-of-the-Art Survey and Recommendations, Exclusive EU Position Report ©2017 Birol Kilkis, TTMD 2017-1, Ankara, Turkey.
- [4] Kılış, B., Kılış, Ş. 2018. An Urban Planning Algorithm for Optimizing the Height of Buildings to Maximize the Share of PV Electricity Generation in a Nearly-Zero Exergy District, Proceedings of the 1st Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water, and Environment Systems, LA. SDEWES 2018.0340, pp. 1-28.



- [5] Hamza, S., Tonya, D. ve Kılış, B. 2019. Havadan-Havaya, Split, Salon Tipi İklimlendirme Cihazlarında Enerji ve Ekserji-Optimum Çözüm ve Değerlendirme Ölçütleri, EM-2018-287, 14.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20 Nisan, İzmir.
- [6] Kılış, Şiir. 2015. A Rational Exergy Management Model to Curb CO₂ Emissions in the Exergy-Aware Built Environments of the Future, Doctoral Thesis September 2011, Division of Building Technology School of Architecture and the Built Environment KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [7] ASHRAE. 2013. ASHRAE Standard 84-2013, Method of Testing Air-to-Air Heat/Energy Exchangers, Atlanta.
- [8] TSE.1997. Isı Eşanjörleri- Havadan-Havaya ve Atık Gazlardan Isı Kazanım Cihazlarının Performansının Tayini İçin Deney, Metotları, TS EN 308, Ankara.
- [9] Koenigshofer, D. And Roberts, J. 2018. Do OA Economizers Make 'Cents' in Hospitals? ASHRAE J., November 2018, pp: 12-22, ASHRAE: Atlanta.
- [10] Bleys, B., Jensen, S. O., and Pomianowska, A. M. 2018. Annex 67-Energy Flexible Buildings, REHVA Journal, December 2018.

ÖZGEÇMİŞ

BİROL KILKIŞ

1949 yılında Ankara da doğdu. ODTÜ Makina Müh. Bölümünden 1970 yılında Yüksek Şeref derecesi ile mezun oldu. 1971-1972 yıllarında TÜBİTAK NATO bursu ile Brüksel NATO von Karman Enstitüsünde akışkanlar mekaniği ve aerodinamik konularında çalışarak şeref derecesi ile mezun oldu. 1973 yılında Y. Lisans ve 1979 yılında Doktora derecelerini aldı. 1981 yılı TÜBİTAK Teşvik Ödülü sahibi Kılış, 1999 da ODTÜ Makine Müh. Bölümü Profesör kadrosundan emekli oldu. ASHRAE nin değişik teknik komitelerinde görevlidir. 2003 yılında uluslararası başarılarından dolayı ASHRAE Fellow üyeliğine yükseltildi Kılış 2004 yılında da *Distinguished Lecturer* seçilmiştir. 2008 yılında ise *Distinguished Service* ve *Exceptional Service* ödülleri almıştır. Yeşil ve sürdürülebilir binalar konusunda uzman olup, karbon dioksit salımları, enerji performansı ve bölge enerji sistemleri üzerinde ekserji tabanlı çözümleri bulunmaktadır. Yeni Nesil Melez Güneş Enerjisi Sistemleri ve Isı Pompaları üzerinde patentleri mevcuttur. AB Başkanlığına karbon dioksit azaltımı konusunda raporlar hazırlamaktadır. 2017-2019 yılları arasında Türk Tesisat Mühendisleri Derneğinin Yönetim Kurulu Başkanlığını yürütmüştür.