ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Beraber Isı ve Güç Sistemlerinde Üretilen Isının Ekserji Akılcı Değerlendirilme Seçenekleri

**Birol KILKIŞ**

*Prof. Dr.*
*Ostim Teknik Üniversitesi*
*Makine Mühendisliği*
*Ankara*
*birolkilkis@hotmail.com*
*orcid: 0000-0003-2580-3910*

**ÖZ**

*Küresel kriz kapsamında beraber ısı ve güç sistemlerinin önemi hızla ve yaygın bir biçimde artmaktadır. Dış ortam sıcaklığının ve konfor beklentilerinin de artması ile, üretilen ısının daha çok soğutmada kullanılması söz konusudur. Ancak, soğutma arz ekserjisinin ısıtmaya göre daha az olması ve süreçte birden fazla cihazı kümeleme gereği en uygun çözümlere ulaşmayı, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları söz konusu olduğunda zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada bir beraber ısı ve güç sisteminin ısı arzının en uygun ve çevreci değerlendirmesi yapılmak üzere bütüncül bir eniyileme modeli geliştirilmiş ve beş seçenek ekserji tabanlı on ölçütle değerlendirilmiştir. Seçeneklerden birisi yaklaşık sıfır karbon veri merkezi olup diğerlerinde ısı pompası, ORC esaslı elektrik üreteci, absorpsiyonlu veya adsorpsiyonlu soğutma makineleri değişik bileşkelerde yer almaktadır. Örnek sonuçlar irdelendiğinde ısı çıktısının-yeterli talep varsa- ısı olarak değerlendirilmesinin daha akılcı olacağı, ancak bir veri merkezinin soğutulmasında önerilen bileşkelerin de soğutma taleplerini karşılamada en akılcı yöntem olacağı görülmektedir.*

**Anahtar Kelimeler**

*Beraber Isı ve Güç, Bölge Enerji Sistemi, Ekserji Tabanlı Kaynak Değerlendirme Etkinliği, Karbonsuzlaşma.*

# Options for Exergy-Rational Utilization of Heat Generated by Combined Heat and Power Systems

**ABSTRACT**

*Within the scope of the global warming issue, the importance of heat and power systems is increasing in a fast and wide manner. With the increase in outdoor temperatures and comfort expectations, the generated heat by the so-called CHP systems is going to be primarily used in cooling. However, the fact that the cooling supply exergy is less than heating and the necessity of clustering multiple devices in the process makes it difficult to explore and find the most appropriate solutions, particularly when renewable energy sources are involved. In this study, a holistic optimization model was developed to achieve the most appropriate and environmentally friendly assessment of the heat supply of a heat and power system, and five cases were evaluated with ten exergy-based criteria. One of the options is the nearly-zero carbon data center, while the others include heat pumps, ORC-based electricity generators, absorption and adsorption cooling machines in different combinations. Results show that it would be more rational to utilize the heat output as heat if there is sufficient demand. Otherwise, an optimally designed data center cooling system would be the most rational method among other cooling options.*

**Keywords**

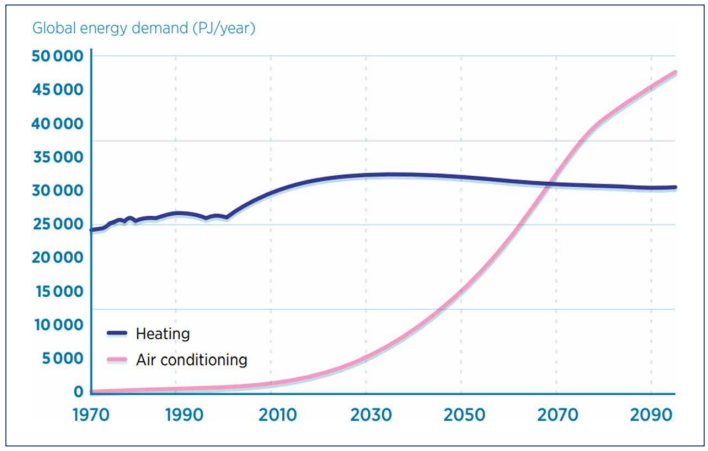
*Combined Heat And Power, District Energy System, Exergy-Based Resource Utilization Effectiveness, Decarbonization.*

Geliş Tarihi : 05.05.2023
Kabul Tarihi : 30.05.2023

Kılkış, B., Beraber Isı ve Güç Sistemlerinde Üretilen Isının Ekserji Akılcı Değerlendirilme Seçenekleri, Tesisat Mühendisliği Dergisi, sayı: 198, sf. 53-63, Eylül-Ekim 2023.

## 1. GİRİŞ

Bölge enerji sistemleri ve soğutma hizmeti de verebilen beraber ısı ve güç sistemleri (Cogeneration, Combined Heat and Power: CHP), küresel krize karşı bireysel veya bölgesel kapsamda karbonsuzlaşmaya yönelik iki ana anahtar çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, brüt ulusal üretiminin ikiye katlandığı, ısıtılan alanlar ve elektrik tüketimleri de oldukça artan Danimarka, ilk petrol krizinden bu yana birincil enerji talebini sabit tutabilen ender ülkelerden birisidir [1]. Danimarka bu başarıyı yenilenebilir enerji kaynaklarını yapılı çevre ile bölge enerji sistemleri, ısı pompaları, enerji depolaması ve CHP sistemlerini yaygın biçimde uygulayarak ede etmiştir. CHP sistemleri, fosil yakıt kullansalar bile daha yakıt tasarruflu ve enerji akılcı olabilmektedir [2]. Bu kapsamda, EPA, CHP sistemleri için Excel-tabanlı ve başta $CO_2$ salım tahmini olmak üzere bir hesaplama aracı geliştirmiştir [3]. Ancak, bu yöntem, diğer hesaplama yöntemleri gibi sadece Termodinamiğin 1.ci yasası ile sınırlı olup tüm enerji dönüştürüm, depolama, nakil ve kullanım aşamalarında oluşan ekserji yıkımlarının neden olduğu neredeyse-önlenebilir ek $CO_2$ salımlarını ve diğer salımları göz ardı etmektedir. Bu ek salımlar aslında görünür ve ölçülür salımların Dünya ortalamasında en az %80`i kadardır. Bu salım kaynakları göz ardı edildiği sürece de küresel ısınmanın önüne geçilemez ve Paris Anlaşması hedeflerine ulaşmak mümkün olmaz, çünkü sorunu izlemekte devam edilir ama sorun kaynaklarının ancak yarısı kadarını görüp o oranda çözümleri üretip uygulamaya geçirebiliriz. Bu da amacın gerçekleşmesine yetmez. Nitekim, bir CHP sistemi yakıtın %30`u kadarı ile elektrik gücü, %55 kadarı ile de 95 °C de ısı üretiyor olsun. Bu sistemin 1.ci yasa verimi %85`dir. Aynı verimde ancak bu kez %30 ısı %55 elektrik üreten bir CHP sistemi olsun. Doğal olarak bu ikinci sistemin enerji bilançosuna, dolayısı ile çevreye olumlu katkısı daha fazladır zira elektrik gücünün birim ekserji 0,95 kW/kW, ısının ise yaklaşık %20 dolayındadır. Bu bağlamda ısıyı %85 verimle üreten ve %85 elektrik gücü üreten iki ayrı sistemin (SHP: Separate Power and Heat System) ekserji yıkımları ve salım sorumlulukları oldukça farklı olsa da 1.ci yasa açısından bu seçenekler hiç fark etmez. CHP ve bölge enerji sistemlerinin güç ve ısı oranları $C_{CHP}$, $C_{BE}$ yanı sıra üretilen ve tüketilen ısı sıcaklıkları dinamik anlamda dengelenirken amaç en az salım sorumluluğu olmalı ve mutlaka 2.ci yasa uygulanmalıdır. Isıl güç, günümüzün 5.ci nesil bölge ısıtma ve soğutma sistemlerinde ve %100 yenilenebilir enerji kaynaklı akıllı kentler doğrultusunda en az elektrik gücü kadar önemli bir konuma gelmiştir. Küresel ısınmanın doğal bir sonucu olarak da soğutma yükleri tüm enerji tasarruf önlemlerine karşın dünyada giderek artmaktadır [4]. Örneğin AB ülkelerinde bugünkü CBE oranı 0,18 iken bu oran hızlı bir biçimde artmaktadır. Bu nedenle yapılı çevrede ısıdan çok soğuk ön plana geçmektedir. 2070 yılında soğutma yüklerinin ısıtma yükünü geçeceği kestirilmektedir (Şekil 1) [5]. Bu nedenle CHP sistemlerinden CCHP sistemlerine (üçlü üretim) geçiş kaçınılmaz olmakla birlikte soğutmada ekserji yıkımları daha fazladır ve bu olgu da karbonsuzlaşma yönünde önemli bir çelişkiye ve kısır bir döngüye neden olur. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının ve atık ısıların bu amaçlarla kullanılması düşük entalpili bölge ısıtma sistemlerinde düşük ekserjili bina tarımlarına gerek duyar [6]. Bu arada ısı depolamasının




*Şekil 1. Isıtma ve soğutma yüklerinde küresel eğilim [5]*

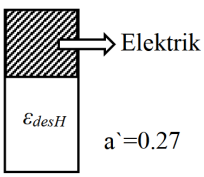
da önemi göz ardı edilmemelidir [7]. Talep fazlası yenilenebilir enerji kaynaklarından veya jeotermal kaynaklardan ve Karadeniz'den hasat edilecek $H_2S$ gazının ayrışımı ile elde edilecek hidrojenin enerji depolaması ve naklinde kullanılması da giderek ön plana çıkmaktadır. Böylelikle, ekserji yıkımları da ($\varepsilon_{des}$) en aza indirilebilecektir. Bunun aksine Danimarka'nın ürettiği rüzgâr enerjisi fazlasını ertesi gün bölge ısıtmada kullanmak üzere elektrik dirençli kazanlarda sıcak suya çevirmesi 2.ci yasaya önem verilmesine olumsuz bir örnektir [8, 9]. Hidrojen ekonomisinde kent atıklarından biyogaz eldesi, hidrojen ve doğal gaz karışımı ile mevcut doğal gaz alt yapısı kullanılabileceği gibi sınai atıklar da kullanılarak jet yakıtı bile üretmek mümkündür. Bu arada özellikle yenilenebilir enerji kaynaklı CHP ve CCHP sistemleri ön plana çıkmaktadır. Buna en güzel örnek olarak güneş enerjili PVT sistemi ve ADS sistemi gösterilebilinir.

## 2. SOĞUTMA ve KLİMA SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIKLARI ENGELLER

Hava kirliliği nedeni ile pandemi vaka sayılarındaki artış ise günümüzde bu döngünün içinde sıkışmış durumdadır. Bu bağlamda, havaalanı, AVM gibi kapalı alanlarda yaz ve kış %100 taze hava ihtiyacı da ek enerji talepleri oluşturmaktadır. Soğutmada kullanılan elektrik ve/veya ısıl gücün birim ekserjileri soğutma gücünün birim ekserjisinden daha yüksek olduğu için bu dönüşümler sırasında ek ekserji yıkımları söz konusudur. Bu yıkımlar ise REMM modelinin işaret etiği enerji niteliğinin akılcı kullanım ölçütü olan, $\psi_R$ değerinin azalmasına ve buna bağlı olarak neredeyse-önlenebilir, $\Delta CO_2$ salımlarına neden olur [8, 9]. Zira, her yıkılan ekserji kadar başka bir yerde, başka bir uygulamada başka birisi, başka bir yöntemle -büyük ihtimalle fosil yakıt kullanarak- bu yıkıma denk bir enerji üretimine gerek duyacaktır (ofset).

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

$$CO_2 \propto 1/COP_c \quad \{COP_c < COP_H\} \quad (2)$$




*Şekil 2. PV veya jeneratör*

## 3. EKSERJİ TABANLI MODEL

### 3.1. Ekserjinin Akılcı Yönetimi, $\overline{\psi}_R$

#### 3.1.1. Ana ekserji yıkımı yararlı uygulamadan sonra

Herhangi bir (i) uygulamasında ana ekserji yıkımı güç üretimi gibi yararlı bir uygulamayı takip eder bir süreçte, örneğin jeneratör veya PV panelde atılan ısı gibi, oluşuyorsa (Şekil 2):

$$\psi_{Ri} = 1 - (\varepsilon_{desi}/\varepsilon_{supi}) \quad (3)$$

#### 3.1.2. Ekserji yıkımı yararlı uygulamadan önce

Düzlemsel güneş enerjili sıcak su toplacında olduğu gibi (Şekil 3) eğer ana ekserji yıkımı, önceden meydana geliyorsa Eşitlik 4 kullanılır. Bu iki eşitlik aynı gibi gözükse de temelindeki ideal Carnot çevrim ifadesi doğrusal olmadığından aynı değildir. Talep tarafında bir ısı pompası kullanılıyorsa (COP >1) $\varepsilon_{dem}$ COP ile çarpılmalıdır. Ancak, düşük ekserjili (LoWex) binalarda ve çok düşük sıcaklıklı 5.ci nesil (5DE) bölge ısıtma uygulamalarında bu iki eşitlik birbirlerine yakınsar. Bu koşulda Eşitlik 5 geçerli olur [10].

$$\psi_{Ri} = 1 - (\varepsilon_{demi}/\varepsilon_{supi}) \quad (4)$$

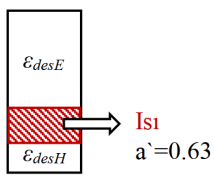
$$\overline{\psi}_R = 1 - (\sum\varepsilon_{des}/\varepsilon_{sup}) \quad (5)$$

Eşitlik 5 kullanıldığında, çoklu ve karmaşık sistemlerdeki ekserji bağlantıları 6-a ve 6-b eşitlikleri aracılığı ile $\overline{\psi}_R$ kolayca tüm aşama ve bağlantılardaki birim ekserji yıkımlarını hesaplayarak bulunur.

$\varepsilon_{des} = \varepsilon_{sup}(1-\psi_R)$ şeklindeki ifade değerlendirildiğinde: (6-a)

$$\Delta CO_2 = \alpha'\varepsilon_{des} = \alpha'\varepsilon_{des}\,(1-\psi_R) \quad \{\alpha' \text{ 0,27 veya 0,63}\} \quad (6\text{-b})$$

$$\Delta CO_2 = \alpha'(1-\sum\varepsilon_{des})(1-R_{EX}) = \alpha'\varepsilon_{sup}\,(1-\overline{\psi}_R)\,(1-R_{EX}) \quad (6\text{-c})$$




*Şekil 3. Düzlemsel toplaç*

### 3.2. Beraber Isı ve Güç Sistemlerinde Yakıt Tasarrufu

Ekserji tabanına yükseltilmiş yakıt tasarruf yüzdesi PES değeri ($PES_R$) [11, 12], Eşitlik 7`de verilmiştir:

$$PES_R = \left[1-\left(\left\{\left(\frac{CHPE\eta}{0.52}\right)+\left(\frac{CHPH\eta}{0.80}\right)\right\}\left(\frac{1.8}{2-\bar{\psi}_R}\right)\right)^{-1}\right]\times 100$$

{Güç ve Isı} (7)

Bu eşitlik uyarınca, en fazla ekserji-tabanlı yakıt tasarrufu, $\bar{\psi}_R$ değerinin en yüksek olması ile mümkündür. Bu denklem güç ve ısı üretimi için geçerlidir. Soğutma yüklerinin giderek artması göz önünde alındığında bu eşitliğin bir kademe daha yükseltilerek soğutma ağırlıklı biçime getirilmesi gerekmiştir:

$$PES_R = \left[1-\left(\left\{\left(\frac{CHPE\eta}{0.52}\right)+\left(\frac{CHPH\eta}{0.80}\right)+\left(\frac{CHPC\eta}{\left(\frac{1}{PEF}\right)\times COP_c}\right)\right\}\left(\frac{1.8}{2-\bar{\psi}_R}\right)\right)^{-1}\right]\times 100$$

(8)

Bu eşitlikte, üretilen ısının kısmen bir ABS sisteminde soğuğa dönüştürüldüğü düşünülmüş (CHPCη), ve referans değeri olarak da şebeke elektriği ile çalışan ve $COP_c$ değeri 4 olan bir ısı pompası kabul edilmiştir. PEF katsayısı (=2,5) Avrupa ülkelerinin ortalama yakıttan-prize güç gereksinim katsayısıdır. 0,52 ve 0,80 referans değerleri AB genelinde sırası ile kombine güç santral referans verimi ve yoğuşmasız kazan ortalama referans verimidir. Bu değerler EU 2004/8/EC yönergesinin uç standartlarında yer alır. Her ülkenin kendi değerleri yerine bu sayılar kullanılır ve böylelikle bir eş baç çalışması mümkün olur Beraber ısı ve güç sistemlerinde yakıtın gizli ısısı kullanılmadığından yakıt tasarrufu da yoğuşmasız kazana göre hesap edilmiştir. Referans $\bar{\psi}_R$ değeri için küresel enerji sektörünün ortalaması olan 0,2 değeri alınmıştır. Bu durumda Eşitlik 2`ye göre, $\Delta CO_2 = 1-0{,}2 = 0{,}8$ olmaktadır. Bu değerin anlamı, şimdiye değin hiç itibar edilmeyen ekserji yıkımlarının olumsuz çevresel etkisinin $CO_2$ salım sorumlulukları türünden ölçtüğümüz ve izlediğimiz doğrudan $CO_2$ salımlarının %80`i kadar büyük bir oran teşkil ettiğidir.

Bir örnek olarak, tüm ısı çift etkili bir ABS sistemi ile soğuğa çevrildiğinde ($COP_{ABS}$ 1,25 ve $\bar{\psi}_R$ 0,65):

$$PES_R = \left[1-\left(\left\{\left(\frac{0.4}{0.52}\right)+\left(\frac{0}{0.80}\right)+\left(\frac{1.25}{(1/2.5)\times COP_c}\right)\right\}\left(\frac{1.8}{2-0.65}\right)\right)^{-1}\right]\times 100 = \%44.7$$

{Güç ve soğuk}

Bu uygulama yerine üretilen ısı, ısı olarak ve daha yararlı bir uygulama dizininde kullanılsa idi ($\bar{\psi}_R$= 0,75);

$$PES_R = \left[1-\left(\left\{\left(\frac{0.4}{0.52}\right)+\left(\frac{0.45}{0.80}\right)\right\}\left(\frac{1.8}{2-0.75}\right)\right)^{-1}\right]\times 100 = \%48$$

Bu iki örnekten de görüleceği üzere ısının -akılcı uygulamalarda kullanmak kaydı ile- ısı olarak değerlendirilmesi daha yakıt tasarrufludur. Öte yandan, $\bar{\psi}_R$ değeri, sadece enerjinin nasıl üretildiği ilgili olmayıp hangi ekserji akılcılığında, nasıl ve nerede değerlendirildiğinin de bir ölçütü olduğu unutulmamalıdır. Aynı soğuk gücünün doğal gaz kazanlı bir ABS sisteminde üretildiği düşünüldüğünde ($\bar{\psi}_R$~ 0.15) büyük oranda yakıt kaybedildiği görülmektedir.

$$PES_R = \left[1-\left(\left\{\left(\frac{0}{0.52}\right)+\left(\frac{0}{0.80}\right)+\left(\frac{1.25\times 0.80}{(1/PEF)\times COP_c}\right)\right\}\left(\frac{1.8}{2-0.15}\right)\right)^{-1}\right]\times 100 = -64\%$$

{Doğal gazlı soğutma}

### 3.3. Doğrudan ve Neredeyse-Önlenebilir $CO_2$ Salım Sorumlulukları

Fosil yakıtlara dayalı ve beraber ısı ve güç üretimini içermeyen diğer bir deyişle elektrik enerjisini (E) ve ısıyı (Q) ayrı ayrı üreten uygulamalarda doğrudan salımlar Eşitlik 9-a`da verilmiştir.

$$CO_2 = c_k\left(\left[\frac{E}{\eta_E\eta_{TE}}+\frac{Q}{\eta_H\eta_{TH}}\right]\right) \{\text{kg } CO_2\} \quad (9\text{-a})$$

$$CO_2 = c_k\frac{E}{\eta CHPE} = c_k\frac{Q}{\eta CHPH}$$

{Beraber ısı ve güç} (9-b)

Herhangi bir süreçte ise,

$$\Delta\overline{CO}_2 = \left[0.27WR+0.63\left(1-WR\right)\right]\left(1-R_{EX}\right)\varepsilon_{des}$$

{kg $CO_2$/kW-h} (10)

$$R_{EX} = \frac{\sum_{i=5}^{7}\varepsilon_i SH_i}{\sum_{j=1}^{7}\varepsilon_j SH_j} \quad (11)$$

Burada WR bir süreçler zincirinde üretilen elektrik enerjisinin toplam üretilen enerjiye oranıdır. Örneğin, sadece ısı üretiliyor ise (kazan gibi) WR oranı 0`dır. Eşitlik 11`de 7 adet ulusal enerji kaynağı göz önünde tutulmaktadır. Bunlardan ilk 3`ü (fosil yakıtlar) sırası ile kömür ve linyit, doğal gaz, fueloil ve nafta türevleri, 4`cüsü hidroelektrik santraller, diğerleri de sırası ile güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji kaynaklarıdır. Yeni inşa edilmiş hidroelektrik santraller gömülü enerji ve $CO_2$ değerlerinin fazla oluşu nedeni ile yenilenebilir enerji olarak kabul edilmemektedir. Bugünkü enerji stoğundaki kırılımlar ve kurulu güç kapasiteleri göz önüne alındığında $R_{EX}$ 0,125, $c_k$ ise 0,217 kg$CO_2$/kW-h olarak bulunur.

### 3.4. Tümleşik Değerlendirme Ölçütleri

1- Akılcı Ekserji Yönetim Verimi, $\psi_R$

$$\psi_R \geq 0{,}7 \ \{\text{Yeşil Uygulama}\} \quad (12)$$

2- Karbon Ayak izi Endeksi, CFI

$$CFI = \frac{\sum \varepsilon_{des}}{\varepsilon_{\sup}} \qquad \{CFI \rightarrow 0\} \quad (13)$$

3- Sürdürülebilir Çevre Endeksi, SEI

$$SEI = \eta_I \psi_R (1 - ODI) \ \text{ or } \ COP\psi_R (1 - ODI) \quad (14)$$

4- Kompozit Ozon Endeksi, ODI

$$ODI = \frac{0.1GWP^{0.03}}{(1 - ODP)} \left( \frac{ALT}{1} \right)^{0.01} \quad (15)$$

5- Çevre Akılcılık Endeksi, CWI

$$CWI = \frac{ODI +}{\psi_R} \quad (16)$$

6- Önlenebilir, Doğrudan Salım Oranı, $RCO_2$

$$R_{CO_2} = \frac{\Delta CO_2}{\Pi CO_2} \quad (17)$$

Bu ölçütler kojenerasyon ısısının verilen taleplere göre en akılcı ve en az salımlı çözüm seçeneklerinin değerlendirilmesinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

## 4. ÖRNEKLER

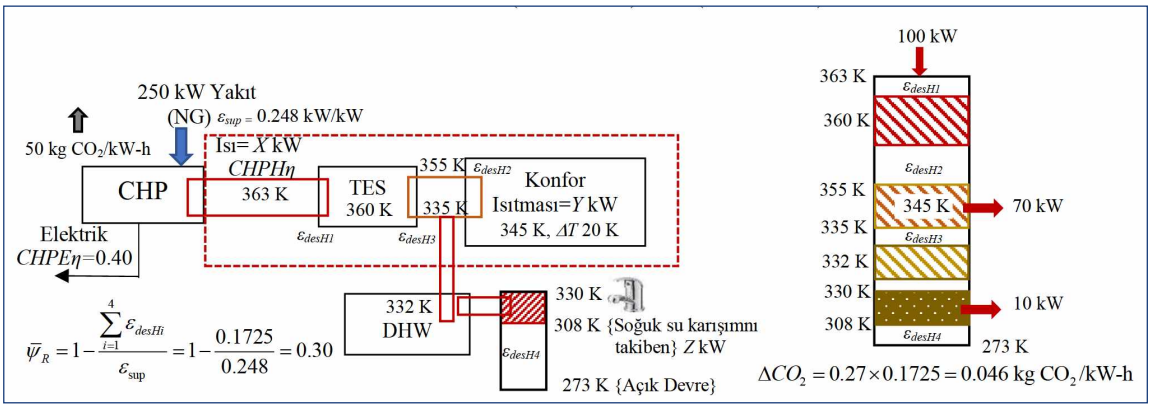
Bu örneklerde aynı kapasitedeki ve doğal gazlı bir beraber ısı ve güç sistemine (CHP) farklı şekillerde bağlanmış ısıtma ve soğutma cihazlarının performansı incelenmiştir. CHP kapasitesi ve işletim koşulları aynıdır: Sıcak su arzı: 363 K (90 °C), elektrik üretim gücü: 100 kW, $C_{CHP}$ = 1, $\eta_{CHP}$ ise 0,40. Dolayısı ile yakıt güç tüketimi: 100 kW/0,40 = 250 kW. Doğal gaz için birim ekserji, $\varepsilon_f$= 0,87 kW/kW.

**Senaryo 1. Baz Senaryo: Sadece Isıdan-Isıya:** Şekil 4`de gösterildiği üzere ekserji yıkımı dört ana noktada oluşmaktadır. Baz senaryoda Esneklik Katsayısı, EK 1 olup $N_{CL}$ ile ilintilidir. EK = $(N_{CL})^{1/3}$.

$$\eta_I = \frac{\sum \dot{Q}_{dem}}{\sum \dot{Q}_{\sup}} = \frac{70 + 10}{100} = 0.80 \quad (18)$$

$$\eta_{II} \ \square \ COP_{EX} = \frac{\sum \dot{Q}_{dem} \varepsilon_{dem}}{\sum \dot{Q}_{\sup} \varepsilon_{\sup}} = \frac{70 \times (1 - 335/355) + 10 \times (1 - 308/330)}{100 \times 0.248} = 0.185 \quad (19\text{-a})$$

$$RUE_{EX} = \frac{250 \times 0.87}{100 \times 0.95 + 70 \times (1 - 273/355) + 10 \times (1 - 273/308)} = 1.93 \quad (19\text{-b})$$




*Şekil 4. Senaryo 1: CHP ısısının bina ısıl yüklerinin karşılanmasında kullanımı, $N_{CL}$ = 2, RUE = 1,43*

**Senaryo 2. Neredeyse-Sıfır Karbon Salımlı Veri Merkezi:** Şekil 5 doğal gazın hidrojen ve biyogaz eklentili biçimde kullanıldığı bir veri merkezini besleyen CHP ünitesini göstermektedir. Sistemde sıcak su depoları (TES ve HW), ısı ile çalışır ORC ünitesi (elektrik ve atık ısı üreteci), toprak kaynaklı ısı pompası (GSHP), ve ısı tahrikli soğutma makineleri (ABS ve ADS) yer almaktadır. Bu yenilikçi sistemde CHP 100 kW elektrik gücü ve 100 kW ısıl güç üretmekte, elektrik gücünün 35 kW`lık bölümü veri merkezinin IT soğutması dışındaki kalan taleplerini karşılamaktadır (Aydınlatma, elektrik motorları, bina konforu vs.). Geri kalan elektrik gücü ise şebekeye verilmektedir (65 kW). IT soğutma gücünün büyük bölümü ısıl enerji dönüşüm sistemlerinde elde edilmektedir. Atık ısı ve IT ısısı içsel olarak değerlendirilmekte ısı soğutma kulelerinden atılmamaktadır. Buna ek olarak, ORC ünitesinin CHP ısısının bir bölümü ile ürettiği 5 kW elektrik gücü ile tahrikli toprak kaynaklı ısı pompasından elde edilmektedir (35 kW, $COP_c = 3$).

Veri merkezlerinde şu an kullanılmakta olan PUE ölçütü bu tür bir uygulamada sistem termodinamiğini tanımakta yetersiz kalmaktadır. Zira, PUE tanımı, sadece veri merkezine giren elektrik gücü ve IT soğutma gücünü göz önünde bulundurmaktadır. Şebeke elektriğinin kaynağı, yerinde elektrik üretiliyorsa nasıl üretildiği (CHP gibi), elektriğin veri merkezi soğutmasının yanında, üretilen yararlı ısıl güçlerle ilgilenmemektedir. Bu yenilikçi sistem mevcut PUE tarifi ile değerlendirilirse (0.4), sektör ortalamasının (1.6) çok altında kalmakta sanki verimi bir değerinden fazla imiş gibi bir intiba uyandırmaktadır. Bu ise termodinamiğin 1.ci yasasına aykırıdır. Ayrıca $CO_2$ salım ve sorumluluklarını da hiç değerlendirememektedir. Bu nedenlerle PUE ölçütü yenilikçi sistemler için kullanılamaz. Bu eksikliği gidermek üzere yeni ölçütler geliştirilmiş olup aşağıda verilmiştir.

$$\text{PUE} = \frac{\text{Toplam Elektrik Güç Talebi}}{\text{IT Soğutma Güç Talebi}} = \frac{35\ \text{kW}+5\ \text{kW}}{100\ \text{kW}}$$

$$\text{PUE} = 0{,}4 \qquad \{\text{COP}_c = 3\}$$

$$COP = \frac{100\ \text{kW}+100\ \text{kW}+100\ \text{kW}}{250\ \text{kW}} = 1.2$$

{ORC ünitesinden elde edilen 5 $kW_e$ içsel üretimdir}

$$COP_{EX} = \left(1-\frac{280\ \text{K}}{1600\ \text{K}}\right)\times COP = 0.99 \approx 1$$

$$RUE_{EX} = \frac{250\times 0.83}{100\times 0.95+100\times\left(1-\frac{273\ \text{K}}{280\ \text{K}}\right)+100\times\left(1-\frac{273\ \text{K}}{285\ \text{K}}\right)} = 2.04$$

{0.83 sayısı yakıtın birim ekserjisidir}

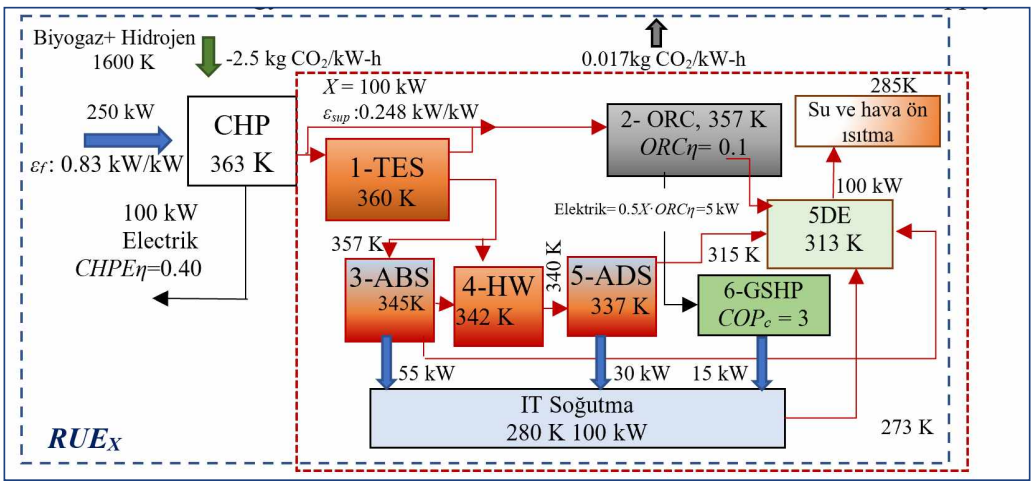
$$RUE = \frac{1}{\eta_I} = \frac{250}{100+100+100} = 0.83 = \frac{1}{COP}$$

$$\Delta CO_2 = 0.27\times\sum \varepsilon_{des} = 0.27\times 0.065 = 0.017\ \text{kg CO}_2\text{/kW-h}$$

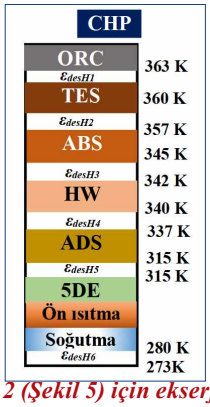
{Şekil 6`daki $\varepsilon_{des}$ değerlerinin toplamından}

$$\bar{\psi}_R = 1-\frac{\sum_{i=1}^{6}\varepsilon_{desHi}}{\varepsilon_{\text{sup}}} = 1-\frac{0.065}{0.248} = 0.74 \geq 0.70$$

{Yeşil Veri Merkezi}




*Şekil 5. Senaryo 2. neredeyse-sıfır karbon salımlı veri merkezi, $N_{CL}$=6*




*Şekil 6. Senaryo 2 (Şekil 5) için ekserji akış diyagramı*

$$CO_2 = -\left(\frac{0.2\times 5\ \text{kW}}{\eta_T = 0.40}\right) = \text{-2.5 kg } CO_2\text{/kW-h}$$

$$\Pi CO_2 \square \sum CO_2 = CO_2 + \Delta CO_2 = +c_K RUE + 0.27\left(1-\frac{\varepsilon_{sup}}{RUE_{EX}}\right) \quad (17)$$

**Senaryo 3: Basit CHP+ABS Sistemi:** Şekil 7, ısının tek-etkili bir absorpsiyon sisteminde doğrudan soğutma gücüne dönüştürüldüğü sistemi göstermektedir.

$$\varepsilon_{CHP} = \varepsilon_{sup} = \left(1-\frac{273}{363}\right) = 0.248\ \text{kW/kW}$$

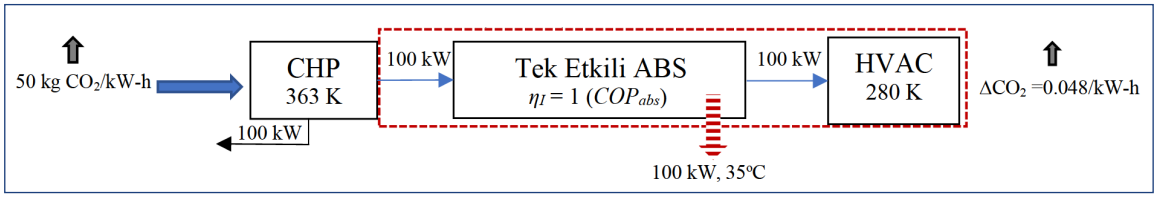
$$\varepsilon_{dem} = \left(1-\frac{273}{280}\right) = 0.025\ \text{W/W}$$

**Senaryo 4: CHP+ORC+HP Soğutma (Isıtma Sistemi:** ORCη = 0,10, $COP_c$ = 3. Halbuki 1.ci yasa uyarınca Senaryo 3 ile başa baş gelebilmesi için COP değerinin 7,5 (3/0,30 x 0,60) = 16,7 olması gerekir ki bu koşul çok kademeli soğutma gruplarında bile pratik anlamda olanaksızdır.

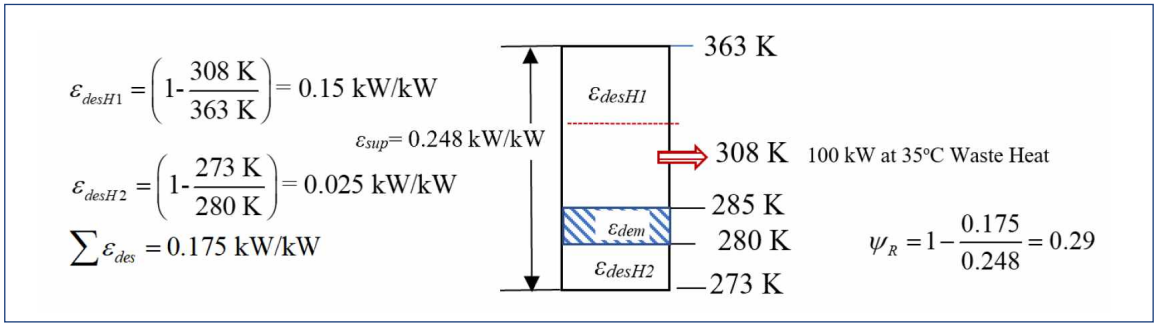
**Senaryo 5: CHP+ADS+ORC+HP Melez Sistem**

## 5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

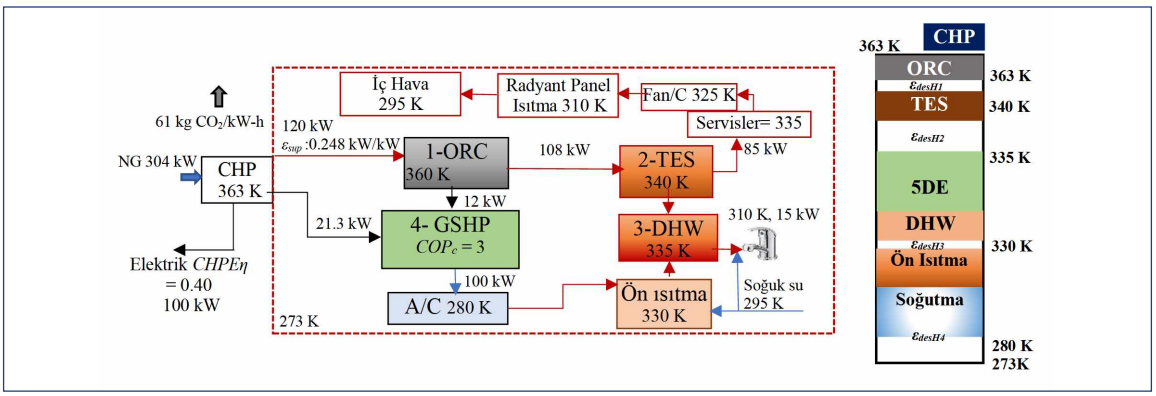
Bu makalede beraber ısı, güç ve soğuk sistemleri temelinde en uygun soğutma amaçlı bileşenlerin çözümlemesine yönelik ekserji tabanlı yöntem geliştirilmiş ve veri merkezi gibi bir örnekte değişik seçenekler incelenmiştir. Bu çerçevede yeni ölçütler uygulanmıştır. Örneğin son günlerde ileri sürülen ve binaların süreç enerjilerini 1.ci yasa uyarınca değerlendiren PEI ölçütü [14] de yetersiz bulunmuş bunun ekserji tabanlı gelişmiş modeli olan $RUE_{EX}$ örneklerle tanıtılmıştır. Bu ölçütün değişik yakıttan soğutmaya olan süreçlerde en az $CO_2$ salım sorumluluğuna ulaşabilecek çözümlerin bulunabildiği gösterilmiştir. Bu bağlamda alışılmış üçlü üretim sistemleri yerine yenilenebilir enerji kaynaklı veya destekli olmak üzere çoklu sistemlerin sunduğu daha geniş seçenekler yelpazesinde bu makalede gösterilen ölçütler yardımı ile en doğru çözümlerin kolaylıkla ve REMM modeli çerçevesinde bulunabileceği gösterilmiştir [15]. Ayrıca, önceki çalışmalar [16] tekrar yorumlanmış, geliştirilmiş ve sistem esneklik katsayısı, EK, $N_{CL}$ türünden ifade edilmiştir.



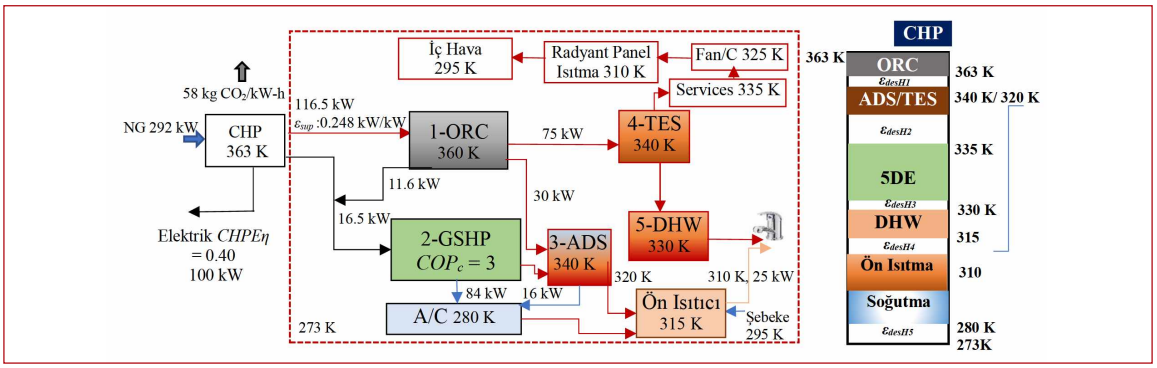

*Şekil 7. Senaryo 3: Isının doğrudan ABS birimde soğutma amaçlı kullanılması, $N_{CL}$ = 1*




*Şekil 8. Senaryo 3: Şekil 7 için ekserji akış diyagramı*




*Şekil 9. Senaryo 4: CHP+ORC+HP, $N_{CL}$ = 4*




*Şekil 10. Senaryo 5: CHP+ORC+ADS+GSHP, $N_{CL}$ = 5*

**Tablo 1. Çevresel Etki ve Ekserji Tabanlı Performans Mukayesesi**

| ISIL UYGULAMA | SENARYO $\varepsilon_{sup}$: 0,248 kW/kW | 1st Yasa | EKSERJİ-TABANLI ÖLÇÜTLER | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\eta_I$ veya COP | i | | | | | | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | $CO_2$ | $\eta_{II}$ | $1/\Sigma\varepsilon_{des}$ | $\overline{\psi}_R$ | 1/CFI | 1/RUE | $0,1/\Delta CO_2$ | 1/(ODI+1) | SEI | $COP_{EX}$ | 1/CWI |
| Isı | 1 (Referans) ($N_{CL}$ = 2) | 0,80 / 50 | 0,185 | 5,8 | 0,30 | 1,4 | 0,70 | 2,2 | 1 | 0,24 | 0,185 | 0,30 |
| Soğuk (veya ısı ve soğuk) | 2 (Veri Merkezi) ($N_{CL}$ = 6) | 1,2 / -2,5 | 0,51 | 3,8 | 0,74 | 3,8 | 1,2 | 5,9 | 0,97 | *0,86 | 1 | 0,76 |
| | 3 (CHP+ABS $N_{CL}$ = 1) | 1,2 / 50 | 0,56 | 5,7 | 0,29 | 1,4 | 0,80 | 2,1 | 0,98 | 0,24 | 0,90 | 0,30 |
| | 4 (CHP+ORC+HP) ($N_{CL}$ = 4) | 1,1 / 61 | 0,52 | 4,5 | 0,55 | 2,1 | 1 | 3,5 | 0,97 | 0,55 | 0,93 | 0,57 |
| | 5 (Seçenek 4+ADS) ($N_{CL}$ = 5) | 1,1 / 58 | 0,53 | 4,4 | 0,65 | 2,5 | 1,1 | 3,1 | 0,96 | 0,71 | 0,95 | 0,68 |

*Hidrojen Sızıntısı İçin

## 6. SİMGELER

| | |
|---|---|
| $a'$ | $a'_H$= 0,27, $a'_E$= 0,63 (Türkiye için), (Eşitlik 10) |
| $c_{av}$ | Enerji stokunun birim salım değeri, $kgCO_2/kW\text{-}h$ |
| $c_k$ | Bir yakıtın birim salım değeri, kg $CO_2/kW\text{-}h$ |
| CFI | Karbon ayak izi endeksi (Carbon Footprint Index) |
| CHPCη | Soğutma gücü üretiminde kısmi verim |
| CHPEη | Elektrik üretiminde kısmi verim |
| CHPHη | Isıtma gücü üretiminde kısmi verim |
| $C_{CHP}$ | Güç-ısı oranı |
| $C_{BE}$ | Talep tarafında güç-ısı oranı |
| $CO_2$ | Bir sistemin veya cihazın doğrudan ve yerinde salımı, kg $CO_2/kW$-henerji |
| $COP_c$ | Soğutma grubunun tesir katsayısı |
| EK | Esneklik katsayısı |
| H | Isıl güç arzı, kW |
| $N_{CL}$ | CHP etrafında gruplandırılan diğer cihazların sayısı |
| P | Pompa veya fan güç talebi, kW |
| PEF | Birincil enerji faktörü (Primary energy factor) |
| PEI | Süreç enerjisi endeksi |
| PER | Birinci enerji oranı, $\eta_T$ x COP |
| PES | Birincil enerji tasarruf Oranı, % |
| $PES_R$ | Ekserji tabanlı birincil enerji tasarruf Oranı, % |
| PUE | Güç değerlendirme etkinliği |
| Q, $\dot{Q}$ (veya H) | Isıl güç arzı, kW-h |
| R | Enerji kaynak harmanında kaynak karışım oranı (nükleer ve yeni büyük hidroelektrik santraller hariç) |
| $R_{CO_2}$ | Neredeyse-önlenebilir salım/toplam salım |
| $R_{EX}$ | Enerji kaynak harmanında ekserji-tabanlı oran |
| RUE | Kaynak değerlendirme etkinliği |
| $RUE_{EX}$ | Ekserji-tabanlı kaynak değerlendirme etkinliği |
| $R_{CO_2}$ | Neredeyse-önlenebilir ekserji yıkım oranı |
| S | Soğuk üretim kapasitesi, kW |
| SEI | Sürdürülebilir çevre endeksi |
| SH | Enerji stokundaki kurulu güç payı, % |
| SHP | Ayrışık ısı ve güç üretimi (Separate heat and power) |
| T | Sıcaklık, K |
| t | Sıcaklık, °C |
| WR | Bir süreçler zincirinde üretilen elektrik enerjisinin üretilen toplam enerjiye oranı |
| ε | Birim ekserji, kW/kW |
| $\psi_R$ | Akılcı Ekserji Yönetim (REMM) Verimi |
| $\overline{\psi}_R$ | Çoklu sistemlerin toplam ψR değeri |
| $\eta_I$ | 1.ci Yasa verimi |
| $\Delta_{CO_2}$ | Ekserji yıkımlarının neden olduğu salım, $kgCO_2/kW\text{-}h$ |
| $\Sigma CO_2$ | Toplam salım (Doğrudan ve neredeyse-önlenebilir), $kgCO_2/kW\text{-}h$ |
| $\Pi CO_2$ | Sağlık boyutu dahil toplam salım, kg $CO_2/kW\text{-}h$ |
| ΔT | Sıcaklık farkı, K |

### Alt Simgeler

| | |
|---|---|
| a | İç (hava) |
| act | Gerçek |
| av | Ortalama |
| B | Bina |
| BE | Bölge enerji sistemi |
| c | Soğutma, çiller |
| D | Bölge |
| dem | Talep |
| des | Yıkım |
| E | Elektrik |
| H | Isı |
| HP | Isı pompası |
| I | 1.ci Kanun ile ilişkili |
| II | 2.ci Kanun ile ilişkili |
| max | Maksimum |
| opt | Optimum |
| ref | Referans |
| ret | Dönüş |
| sup | Arz |

### Kısaltmalar

| | |
|---|---|
| AB | Avrupa Birliği |
| A/C | Klima |
| ABS | Absorpsyon |
| ADS | Adsorpsyon |
| CCHP | Üçlü Üretim, Trijenerasyon (Combined Cooling, Heating, and Power) |
| CHP | Beraber Üretim, Kojenerasyon (Combined Heat and Power) |
| 5DE | 5.ci Nesil Bölge Enerji Sistemi |
| DHW | Sıcak Servis Suyu |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| GSHP | Toprak Kaynaklı Isı Pompası |
| HP | Isı Pompası |
| HT | Sıcak Su Arzı |
| HW | Sıcak Su |
| HVAC | Isıtma, Havalandırma ve Klima |
| IT | Bilgisayar İşletimi |
| LowEx | Düşük Ekserji |
| NG | Doğal Gaz |
| ORC | Organik Rankin Çevrimi |
| PVT | Foto-Voltaik-Isıl |
| REMM | Akılcı Ekserji Yönetim Modeli |
| PV | Foto-Göze |
| PVT | Foto-Voltaik ve Isı |
| RHC | Yenilenebilir Enerji Kaynaklı Isıtma ve Soğutma |
| TES | Isıl Depolama (Thermal Energy Storage) |
| WPH | Su Ön Isıtıcı |

## 7. KAYNAKÇA


[1] Lund, H. (Ed)., 2014, Renewable Energy Systems, Elsevier, ISBN:978-0-12-410423-5

[2] EPA, 2015, Fuel and Carbon Dioxide Emissions Savings Calculation Methodology for Combined Heat and Power Systems, Combined Heat and Power Partnership, 27 pages, <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/fuel_and_carbon_dioxide_emissions_savings_ calculation_methodology_for_combined_heat_and_power_systems.pdf>

[3] EPA., CHP Energy and Emissions Savings Calculator, Version 3.2, June 22, 2020, <https://www.epa.gov/chp/chp-energy-and-emissions-savings-calculator>

[4] Ecoheatcool, 2006, The European Cold Market, Final Report, 45 pages, Belgium. https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/ecoheatcool_the_european_cold_market_final_report.pdf

[5] Hunt J, Zakeri B, Nascimento A, Garnier B, Pereira M, Bellezoni R, de Assis Brasil Weber N, Smith Schneider P, et. al. (2020), High-Velocity Seawater Air-Conditioning With Thermal Energy Storage and its Operation With Intermittent Renewable Energies, Energy Efficiency DOI: 10.1007/s12053-020-09905-0.

[6] Kilkis, B., 2020, An Exergy-Rational District Energy Model for 100% Renewable Cities with Distance Limitations, Thermal Science, Vol. 24, No. 6A, pp: 1-21.

[7] van den Heuvel, M., 2020, Peak Buffering by the Ecovat Thermal Energy Storage System, M.Sc. Thesis, 85 pages, Eindhoven University of Technology, the Netherlands.

[8] Kilkis, B., and Kilkis, S., 2015, Combined Heat and Power with Renewable Energy Sources (in Turkish), Publication no: 32, 371 pages, Turkish Society of HVAC and Sanitary Engineers, Doga Publication Co., ISBN: 978-975-6263-25-9.

[9] Kılkış, Ş, Kılkış, B., 2019, An Urbanization Algorithm for Districts with Minimized Emissions Based on Urban Planning and Embodied Energy Towards Net-Zero Exergy Targets, Energy, 179 (2019) 392-406.

[10] Kilkis, S., Wang, C., Bjork, F., and Ivo Martinac, I., 2016, Cleaner Energy Scenarios for Building Clusters in Campus Areas Based on the Rational Exergy Management Model, Journal of Cleaner Production, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.126/

[11] Kilkis, S., Kilkis, B., A New Metric for Net Zero Exergy Building, Proceedings of ES2007, Energy Sustainability, Paper No: ES 2007-36263, June 27-30, Long Beach, California, 2007.

[12] EU., 2004, Directive 2004/8/EC of The European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on The Promotion of Cogeneration Based on a Useful Heat Demand in the Internal Energy Market and Amending Directive 92/42/EEC, L 52/50, 21.02.2004. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0008&from=EN>

[13] Avgerinou, M., Bertoldi, P., and Castellazzi, L., 2017, Trends in Data Centre Energy Consumption Under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency, Energies, 2017, 10, 1470; doi:10.3390/en10101470.

[14] Chang, R., 2019, A Metric to Characterize Commercial Building Process Loads Energy Use, ASHRAE Journal, November 2019 Issue pp: 12-21.

[15] B. Kılkış ve Ş. Kılkış, 2018, Utilization of Cogeneration Heat in Hot and Humid Mediterranean Climates: Exergetic Change of the Game by Solar Cooling Versus Absorption Cooling, Paper No: SDEWES2018.0533, Palermo, 30.9.-4.10.2018.

[16] Kilkis, B., 2018, Best Method to Utilize Heat of Trigeneration: Exergy Transfer Issues in Absorption Cooling, Seminar 41: The Future of Thermal Cooling to Support Resilient CHP Systems, ASHRAE Annual Conference, June 23-27, 2018, Houston, TX.