



BERABER ISI VE GÜÇ SİSTEMLERİNDE ÜRETİLEN ISININ EKSERJİ AKILCI DEĞERLENDİRİLME SEÇENEKLERİ

Options Of Exergy-Rational Use Of Heat Generated By Combined Heat And Power Systems

Birol Kılış

ÖZET

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 değerlendirilmesi yapılmak üzere bütüncül bir eniyileme modeli geliştirilmiş ve beş seçenek ekserji tabanlı on ölçütü değerlendirilmiştir. Seçeneklerden birisi yaklaşık sıfır karbon veri merkezi olup diğerlerinde ısı pompası, ORC esaslı elektrik üretici, absorpsiyonlu ve adsorpsiyonlu soğutma makineleri değişik bileşmelerde yer almaktadır. Örnek sonuçlar irdelendiğinde ısı çıktısının-yeterli talep varsa- ısı olarak değerlendirilmesinin daha akılcı olacağı, ancak bir veri merkezinin soğutulmasında önerilen bileşmelerin de soğutma taleplerini karşılamada en akılcı yöntem olacağı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Beraber ısı ve güç, bölge enerji sistemi, ekserji tabanlı kaynak değerlendirme etkinliği, karbonsuzlaşma

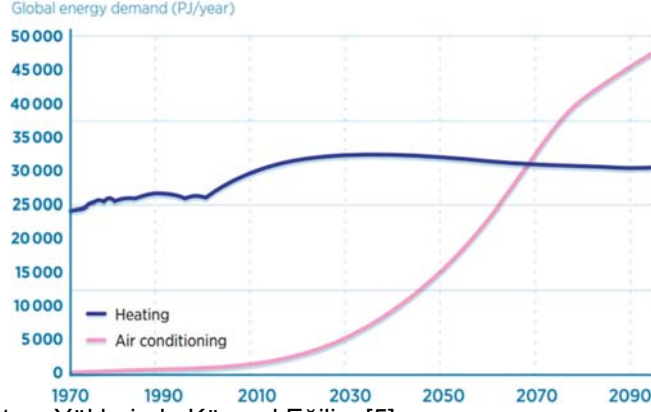
ABSTRACT

Within the scope of the global crisis, 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

1. GİRİŞ

Bölge enerji sistemleri ve soğutma hizmeti de verebilen beraber ısı ve güç sistemleri (Cogeneration: 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 yapıları 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 CO₂ 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 dönüşüm, depolama, nakil ve kullanım aşamalarında oluşan ekserji yıkımlarının neden olduğu neredeyse-önlenebilir ek CO₂ 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 da 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 C_{BE} oranı 0.18 iken bu oran hızlı bir biçimde artmaktadır. Bu nedenle yapıları 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 da önemi göz ardı edilmemelidir [7]. Talep fazlası yenilenebilir enerji kaynaklarından veya jeotermal kaynaklardan ve Karadeniz'den hasat edilecek H₂S gazının ayrışımı ile elde edilecek hidrojenin enerji depolaması ve naklinde kullanılması da giderek ön plana çıkmaktadır. Böylelikle, ekserji yıkımları da (ϵ_{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 sınıai atıklarda kullanılarak jet yakıtı bile üretmek mümkündür. Bu arada özellikle yenilenebilir enerji kaynaklı CHP ve CCHP sistemleri ön plana çıkmaktadır. Buna en güzel örnek güneş enerjili PVT sistemi ve ADS sistemi gösterilebilir.



Şekil 1. Isıtma ve Soğutma Yüklerinde Küresel Eğilim [5]

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 ettiği enerji niteliğinin akılcı kullanım ölçütü olan, ψ_R değerinin azalmasına ve buna bağlı olarak neredeyse-önlenebilir, ΔCO_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).

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

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

3. EKSERJİ TABANLI MODEL

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

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):

(3)

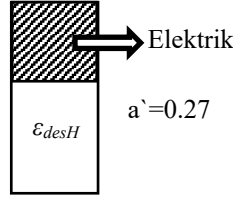
$$\psi_{Ri} = 1 - \frac{\mathcal{E}_{desi}}{\mathcal{E}_{supi}}$$

3.1.2. Ekserji Yıkımı Yararlı Uygulamadan Önce

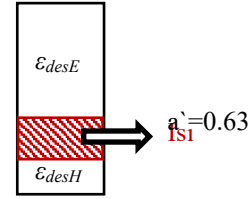
Düzlemsel güneş enerjili sıcak su toplacında olduğu gibi (Şekil 3) eğer ana ekserji yıkımı, önceden meydana geliyorsa Eşitlik 4 kullanılır. Bu iki eşitlik aynı gibi gözükse de temelindeki ideal Carnot çevrim ifadesi doğrusal olmadığından aynı değildir. Talep tarafında bir ısı pompası kullanılıyorsa ($COP > 1$) \mathcal{E}_{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].

$$\psi_{Ri} = \frac{\mathcal{E}_{demi}}{\mathcal{E}_{supi}} \quad (4)$$

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



Şekil 2. PV veya Jeneratör



Şekil 3. Düzlemsel Toplaç

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

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

$$\Delta CO_2 = a' \varepsilon_{des} = a' \varepsilon_{sup} (1 - \psi_R) \{a' 0.27 \text{ veya } 0.63\} \quad (6-b)$$

$$\Delta CO_2 = a' \left(1 - \sum \varepsilon_{des}\right) (1 - R_{EX}) \equiv a' \varepsilon_{sup} (1 - \bar{\psi}_R) (1 - R_{EX}) \quad (6-c)$$

3.2 Beraber Isı ve Güç Sistemlerinde Yakıt Tasarrufu: Ekserji tabanına yükseltilmiş yakıt tasarruf yüzdesi PES_R değeri (PES_R) [11, 12], Eşitlik 7'de verilmiştir:

$$PES_R = \left[1 - \left\{ \left(\frac{CHPE\eta}{0.52} \right) + \left(\frac{CHPH\eta}{0.80} \right) \right\} \left(\frac{1.8}{2 - \bar{\psi}_R} \right) \right]^{-1} \times 100 \quad \{\text{Power and heat}\} \quad (7)$$

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:

$$PES_R = \left[1 - \left\{ \left(\frac{CHPE\eta}{0.52} \right) + \left(\frac{CHPH\eta}{0.80} \right) + \left(\frac{CHPC\eta}{\left(\frac{1}{PEF} \right) \times COP_c} \right) \right\} \left(\frac{1.8}{2 - \bar{\psi}_R} \right) \right]^{-1} \times 100 \quad (8)$$

Bu eşitlikte, üretilen ısının kısmen bir ABS sisteminde soğuğa dönüştürüldüğü düşünülmüş ($CHPC\eta$), 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 yönergeinin yan standartlarında yer alır. Her ülkenin kendi değerleri yerine bu sayılar kullanılır ve böylelikle bir eş bağ 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 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 değer anlamı, şimdiye değin hiç itibar edilmeyen ekserji yıkımlarının olumsuz çevresel etkisinin CO_2 salım sorumlulukları cinsinden ölçtüğümüz ve izlediğimiz doğrudan CO_2 salımlarının %80'i kadar büyük bir oran teşkil ettiğiidir.

Bir örnek olarak, tüm ısı çift etkili bir ABS sistemi ile soğuğa çevrildiğinde (COP_{ABS} 1.25. ve $\bar{\psi}_R$ be 0.65):

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

Bu uygulama yerine üretilen ısı, ısı olarak ve daha yararlı bir uygulama dizininde kullanılsa idi ($\bar{\psi}_R = 0.75$)

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

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 ($\bar{\psi}_R \sim 0.15$) büyük oranda yakıt kaybedildiği görülmektedir.

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

3.3. Doğrudan ve Neredeyse-Önlenebilir CO₂ 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.

$$CO_2 = c_k \left(\left[\frac{E}{\eta_E \eta_{TE}} + \frac{Q}{\eta_H \eta_{TH}} \right] \right) \quad \{\text{kg CO}_2\} \quad (9-a)$$

$$CO_2 = c_k \frac{E}{\eta_{CHPE}} = c_k \frac{Q}{\eta_{CHPH}} \quad \{\text{Beraber ısı ve güç}\} \quad (9-b)$$

Herhangi bir süreçte ise,

$$\Delta \overline{CO}_2 = [0.27WR + 0.63(1-WR)](1-R_{EX}) \varepsilon_{des} \cdot \quad \{\text{kg CO}_2/\text{kW-h}\} \quad (10)$$

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

Burada WR söz konusu süreçte ne kadar ısı ve ne kadar güç üretildiğinin oranıdır. Örneğin, sadece ısı üretiliyorsa WR oranı 1`dir. 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 CO₂ değerlerinin fazla oluşu nedeni ile yenilenebilir enerji olarak kabul edilmemektedir. Bu günkü enerji stokundaki kısıtlımlar ve kurulu güç kapasiteleri göz önüne alındığında R_{EX} 0.125, c_k ise 0.217 kg CO₂/kW-h olarak bulunur.

3.4. Tümüleşik Değerlendirme Ölçütleri.

1- Akılcı Ekserji Yönetim Verimi, ψ_R

$$\psi_R \geq 0.7 \quad \{\text{Yeşil Uygulama}\} \quad (12)$$

2- Karbon Ayak izi Endeksi, CFI.

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

3- Sürdürülebilir Çevre Endeksi, SEI.

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

4- Komposit 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

$$CWI = \frac{ODI+1}{\psi_R} \quad (16)$$

6- Önlenebilir, Doğrudan Salım Oranı, R_{CO2}

$$R_{CO_2} = \frac{\Delta \overline{CO}_2}{\Pi CO_2} \quad (17)$$

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

4. ÖRNEK ÇALIŞMALAR

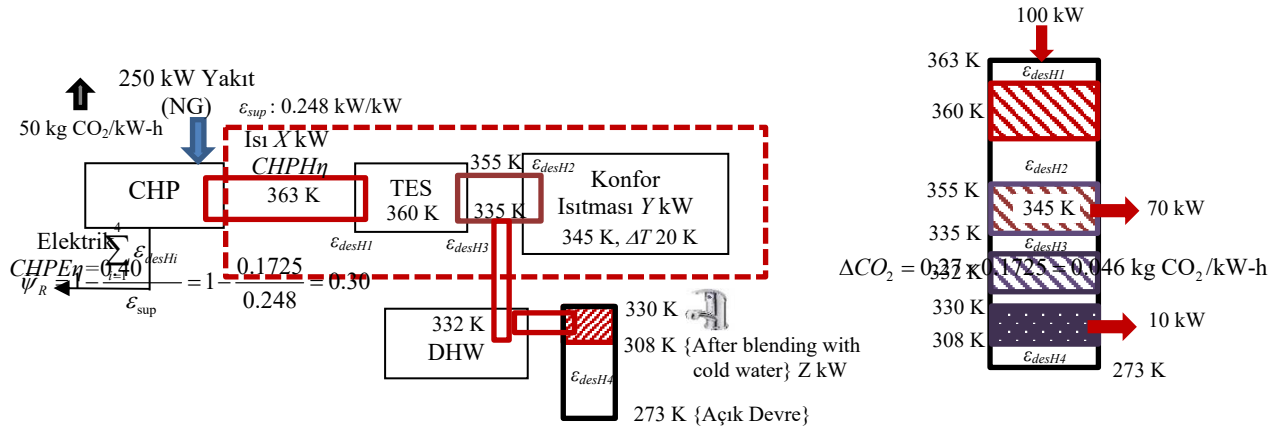
Bu çalışmada aynı kapasitedeki ve doğal gazlı bir beraber ısı ve güç sistemine (CHP) farklı şekillerde bağlanmış ısıtma ve soğutma cihazlarının performansı incelenmiştir. CHP kapasitesi ve işletim koşulları aynıdır: Sıcak su arzı: 363 K (90°C), elektrik üretim gücü: 100 kW. $C_{CHP} = 1$, η_{CHP} is 0.40. Dolayısı ile yakıt güç tüketimi: $100 \text{ kW}/0.40 = 250 \text{ kW}$. Doğal gaz için birim ekserji, $\varepsilon_F = 0.87 \text{ kW/kW}$.

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

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

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

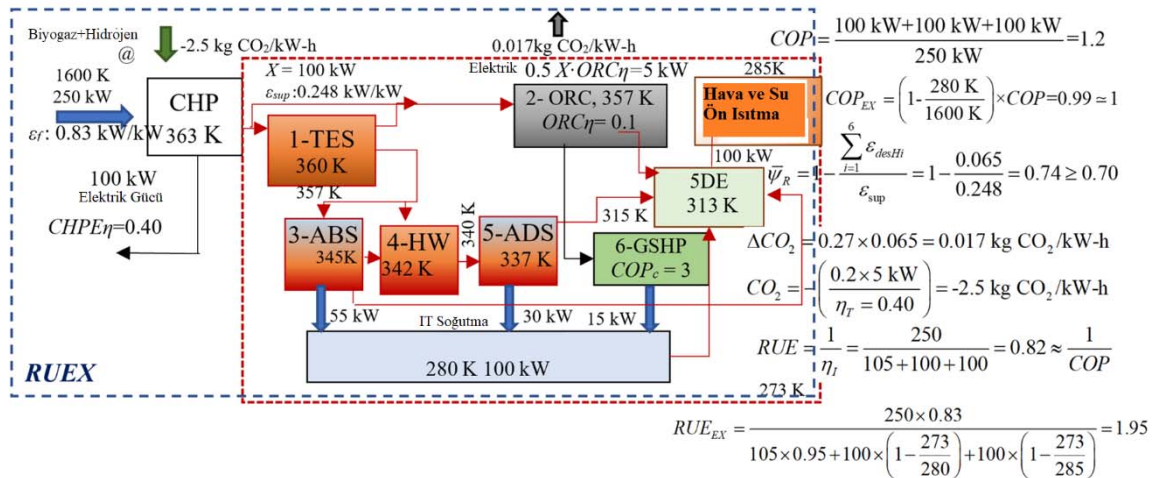
$$RUE_{EX} = \frac{250 \times 0.87}{100 \times 0.95 + 70 \times (1 - 273/355) + 10 \times (1 - 273/308)} = 1.93 \quad (19-b)$$



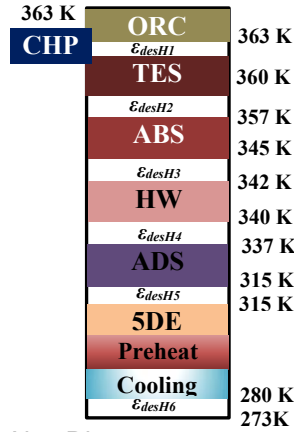
Şekil 4. Senaryo 1: CHP Isısının Bina Isıl Yüklerinin Karşılmasında Kullanımı, $N_{CL} = 2$, $RUE = 1.43$

Senaryo 2. Neredeyse-Sıfır Karbon Salımlı Veri Merkezi. Şekil 5 doğal gazın hidrojen ve biyogaz eklentili yakıtın kullanıldığı bir veri merkezi güç ve soğutma merkezini göstermektedir. Veri merkezlerinde kullanılmakta olan PUE ölçütü bu tür bir uygulamada sistem termodinamiğini tanımakta yetersiz kalmaktadır. Örneğin bu yenilikçi sistemin PUE değeri (1.33) sektör ortalamasının (1.6) altında kalmaktadır.

$$PUE = \frac{100 \text{ kW} + 100 \text{ kW}}{COP_c} = 1.33 \quad \{COP_c = 3\}$$



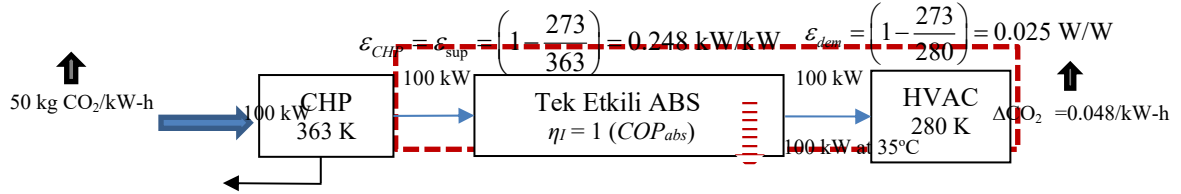
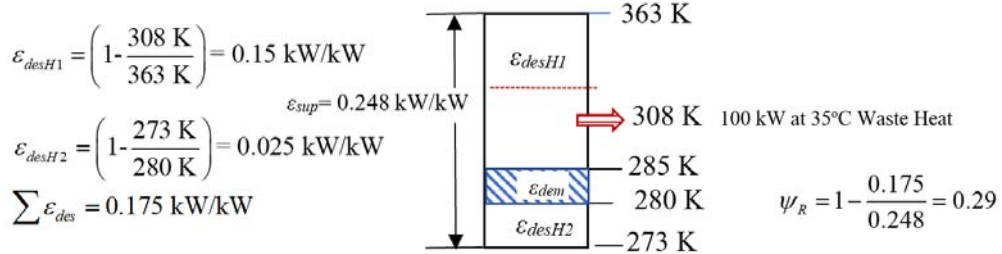
Şekil 5. Senaryo 2. Neredeyse-Sıfır Karbon Salımlı Veri Merkezi, $N_{CL}=6$



Şekil 6. Senaryo 2 (Şekil 5) için Ekserji Akış Diyagramı

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

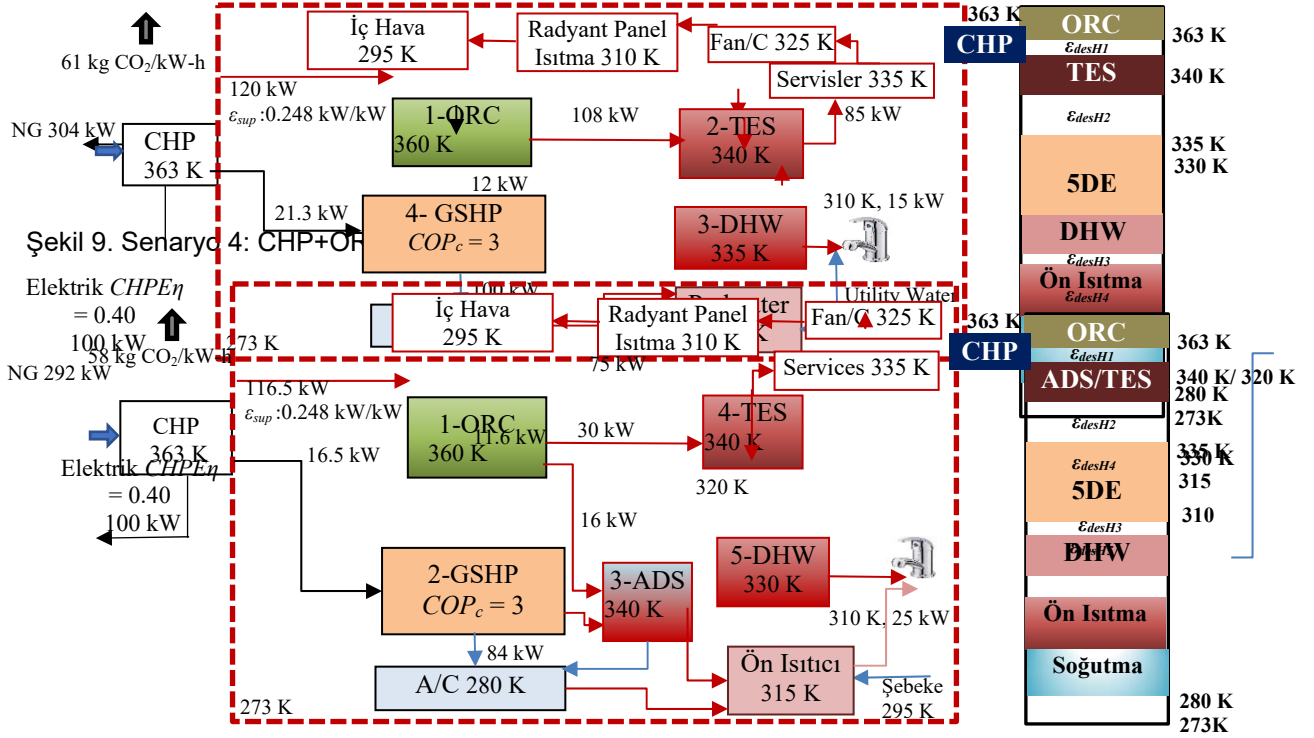
Senaryo 3: Simple CHP+ABS System: Şekil 7, ısının tek-etkili bir absorpsiyon sisteminde doğrudan soğutma gücüne dönüştürüldüğü sistemi göstermektedir.


 Şekil 7. Senaryo 3: Isının Doğrudan ABS Birimde Soğutma Amaçlı Kullanılması Cooling, $N_{CL} = 1$


Şekil 8. Senaryo 3: Şekil 7 için Ekserji Akış Diyagramı

Senaryo 4: CHP+ORC+HP Soğutma (Isıtma Sistemi): $ORC\eta = 0.10$, $COP_c = 3$. Halbuki 1.ci yasa uyarınca Senaryo 3 ile başa baş gelebilmesi için COP değerinin $7.5 (3/0.30 \times 0.60) = 16.7$ 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 çözümlenmesine 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, NK , N_{CL} cinsinden formüle edilmiştir.

Tablo 1. Çevresel Etki be Ekserji Tabanlı Performans Mukayesesi

ISIL UYGULAMA	SENARYO $\epsilon_{sup}: 0.248$ kW/kW	1 st Yasa	EKSERJİ-TABANLI ÖLÇÜTLER									
		η_i or COP	<i>i</i>									
		CO ₂	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		η_{II}	$1/\sum \epsilon_{des}$	$\bar{\psi}_R$	1/CFI	1/RUE	0.1/ Δ CO ₂	$\frac{1}{ODI+1}$	SEI	COP _{EX}	1/CWI	
Isı	1 (Referans) (N _{CL} = 2)	0.80	0.185	5.8	0.30	1.4	0.70	2.2	1	0.24	0.185	0.30
		50										
Soğuk (veya ısı ve soğuk)	2 (Veri Merkezi) (N _{CL} = 6)	1.2	0.51	3.8	0.74	3.8	1.2	5.9	0.97	*0.86	1	0.76
		-2.5										
	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
		50										
	4 (CHP+ORC+HP) (N _{CL} = 4)	1.1	0.52	4.5	0.55	2.1	1	3.5	0.97	0.55	0.93	0.57
61												
5 (Case 4+ADS) (N _{CL} = 5)	1.1	0.53	4.4	0.65	2.5	1.1	3.1	0.96	0.71	0.95	0.68	
58												

*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, kg CO ₂ /kW-h
C_k	Yakıtın birim salım değeri, kg CO ₂ /kW-h
CFI	Karbon ayak izi endeksi
CHPC η	Soğutma gücü üretiminde kısmi verim
CHPE η	Elektrik üretiminde kısmi verim
CHPH η	Isıtma gücü üretiminde kısmi verim
C_{CHP}	Güç-ısı oranı
C_{BE}	Talep tarafında güç-ısı oranı
CO ₂	Doğrudan CO ₂ salımı, kg CO ₂ /kW-h
COP _c	Soğutma grubunun tesir katsayısı
EK	Esneklik Katsayısı
H	Isıl güç arzı, kW
N _{CL}	CHP etrafında gruplandırılan cihaz sayısı
OM	İşletim karı, kg CO ₂ /kW-h
P	Pompa veya fan güç talebi, kW
PEF	Birincil Enerji Faktörü
PEI	Süreç enerjisi endeksi
PER	Birinci enerji oranı, $\eta_T \cdot COP$
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



R_{CO_2}	hidroelektrik santraller hariç)
R_{EX}	Neredeyse-önlenebilir salım/toplam salım
RUE	Enerji kaynak harmanında ekserji-tabanlı oran
RUE_{EX}	Kaynak değerlendirme etkinliği
R_{CO_2}	Ekserji-tabanlı kaynak değerlendirme etkinliği
S	Neredeyse-önlenebilir ekserji yıkım oranı
SEI	Soğuk üretim kapasitesi, kW
SH	Sürdürülebilir Çevre Endeksi
T	Enerji Stokundaki kurulu güç payı, %
t	Sıcaklık, K
WR	Sıcaklık, °C
durum	Bir süreç zincirinde esas ekserji yıkımının yararlı iş üretiminden sonra olan sayısının esas ekserji yıkımının yararlı iş üretiminden önceki duruma oranı
ε	Birim ekserji, kW/kW
ψ_R	Akılcı Ekserji Yönetim (REMM) Verimi
$\bar{\psi}_R$	Çoklu sistemlerin toplam ψ_R değeri
η_I	1.ci Yasa verimi
ΔCO_2	Ekserji yıkımlarının neden olduğu salım, kg CO ₂ /kW-h
ΣCO_2	Toplam salım (Doğrudan ve neredeyse-önlenebilir), kg CO ₂ /kW-h
$I CO_2$	Sağlık boyutu dahil toplam salım, kg CO ₂ /kW-h
ΔT	Sıcaklık farkı, K
<u>Alt Simgeler</u>	
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
<u>Kısaltmalar</u>	
AB	Avrupa Birliği
A/C	Klima
ABS	Absorpsiyon
ADS	Adsorpsiyon
CCHP	Üçlü Üretim, Trijenerasyon
CHP	Beraber Üretim, Kojenerasyon
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
HVAC	Isıtma, Havalandırma ve Klima
LowEx	Düşük Ekserji



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
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] Kılış, Ş., Kılış, 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. Kılış ve Ş. Kılış. 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 Trigeration: 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.

8. TEŞEKKÜR

Bu araştırmada öncelikle veri merkezleri özelinde birlikte çalışmakta olduğum Hacettepe Teknokent Polar Teknoloji yöneticileri Sayın Koray Kentli ve Berkay Kentli'ye uzun süredir göstermekte oldukları yoğun ilgi, destek ve verdikleri motivasyon için çok teşekkür ederim.

Ayrıca Doç. Dr. Şiir Kılış'ın geliştirmiş olduğu REMM modelinin bu çalışmanın temelinde çok yararlı olduğunu belirtir kendisine çok teşekkür ederim.

9. ÖZGEÇMİŞ

BİROL KILKIŞ

1949 yılında Ankara da doğdu. ODTÜ Makina Müh. Bölümünden 1970 yılında Yüksek Şeref derecesi ile mezun oldu. 1971-1972 yıllarında TÜBİTAK bursu ile Brüksel 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. 1980'li yıllarda altı adet Isı Pompası TSE Standardı hazırlamıştır. ASHRAE'nin değişik teknik komitelerinde görevlidir. 2003 yılında uluslararası başarılarından dolayı ASHRAE Fellow üyeliğine yükseltilen Kılış 2004 yılında da Distinguished Lecturer seçilmiş, 2008 yılında *Distinguished Service* ve *Exceptional Service* ödülleri almıştır. Green Energy Council üyesi, *Int. Journal of Green Energy* ve *Exergy* Dergilerinin Editörler Kurulu üyesi ve IEA Heat Pump Programı gözlemci üyeliğinde bulunmuştur. Ayrıca ASHRAE El Kitaplarının revizörlüğü yapmaktadır. Yeşil ve sürdürülebilir binalar, karbon dioksit salımları, enerji performansı, ekserji akılcılığı ve bölge enerji sistemleri üzerinde ekserji tabanlı çözümleri bulunmaktadır. Yeni Nesil Melez Güneş Enerjisi Sistemleri ve Isı Pompaları üzerinde patentleri mevcuttur. Avrupa Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Isıtma ve Soğutma Kurulu (RHC) alt komite ikinci Başkanı olup AB Başkanlığına karbon dioksit azaltımı konusunda raporlar hazırlamaktadır. Türkiye'nin ilk LEED Platin Binasının Mekanik Tasarım Danışmanlığını gerçekleştirmiş olan Kılış, Türk Tesisat Mühendisleri Derneğinin 13. Dönem Yönetim Kurulu Başkanlığında da bulunmuştur.