

**GÜNEŞ VE RÜZGÂR ENERJİSİNDEN ÜRETİLEN
GÜÇ VE ISININ YAPILI ÇEVREDE EKSERJİ-AKILCI
PAYLAŞIMI VE DEPOLAMASI**

Birol Kılış, Prof. Dr.

Polar Proje ve Teknoloji

Hacettepe Üniversitesi Beytepe Yerleşkesi Teknokent

1 ci. Arge Binası No: 22 Çankaya Ankara

E-posta: birolkilkis@hotmail.com

Telefon: 05343430042

GÜNEŞ VE RÜZGÂR ENERJİSİNDEN ÜRETİLEN GÜÇ VE ISININ YAPILI ÇEVREDE EKSERJİ-AKILCI PAYLAŞIMI VE DEPOLAMASI

ÖZET

Bu çalışmada güneş enerjisinden elde edilen elektrik gücü ve ısının bir bölge enerji sisteminde değerlendirilmesinde termodinamiğin ikinci yasasının küresel ısınma, ekonomi, ekserji akılcılığı ve küresel karbonsuzlaştırma yönlerinden önemi ön plana çıkarılmıştır. Bu bağlamda, özellikle düşük ekserjili bölge ısıtma sistemlerinin tasarımı ve işletiminde ortaya konulan yeni değerlendirme ölçütlerinin gereği örnek bir küçük güneş enerjili sistemle gösterilmiştir. Bu örnekte düzlemsel sıcak su toplaçlarının veya foto-voltaik-ısı sistemlerinin küresel karbonsuzlaştırmada başarılı olabilmeleri için bölge sistemindeki mesafelerin ve boru çaplarının çok önemli olduğu ve bu konuda gerekli pompaj ekserjisine oranla ekserji yıkımlarının dikkatle incelenmesi gereği vurgulanmıştır. Güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin depolanmasında sıcak suya dönüşümle ısı depolamasının olumsuzlukları tartışılmış bu yöntemin yerine gerekçeli biçimde hidrojen ekonomisi önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Rüzgâr enerjisi, Ekserji akılcılığı, Enerji depolaması, Hidrojen ekonomisi, Küresel ısınma, Karbonsuzlaştırma, Bölge enerji sistemi

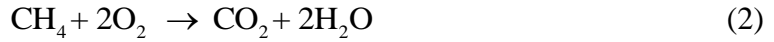
GİRİŞ VE AMAÇ

Karbonsuzlaştırma yolu ile küresel ısınmayı önleme girişimleri sadece iki olguyu; doğrudan CO₂ salımlarını ve ozon-zararlı soğutucu akışkan zararlarını ayrı ayrı olmak üzere göz önünde tutmaktadır. Daha da önemlisi, doğrudan CO₂ salımları yansırı enerji kalitesinin (ekserji) yararlı işlerde ne denli akılcı değerlendirildiğine bağlı olarak oluşan önlenebilir CO₂ salım sorumluluklarının olumsuz etkileri doğrudan CO₂ salımları kadar önemli olabilmektedir. Dolayısı ile, bu tür salım sorumlulukları da göz önünde tutulmadıkça karbonsuzlaştırma girişimlerinin eksik kalacağı ortadadır. Bunun da ötesinde, doğrudan ve önlenebilir CO₂ salımları, ozon tabakasını seyreltici gazların salımı yanında soğutma kulelerinden salınan su buharı da bir üçlü etmen olarak birbirleri ile doğrudan ilişkilidir ve küresel ısınmayı daha hızlı ve kapsamlı biçimde tetiklemektedir. Bu bağlamda birçok ülke tarafından yenilenebilir enerji kaynakları ön plana çıkarılmakla birlikte bu sistemlerin de ekserjiyi ne denli akılcı değerlendirdiklerine bağlı olarak önlenebilir CO₂ salımları ve yapım ve kurulumlarındaki gömülü CO₂ salımları yanında bu sistemlere bağlı ise ısı pompalarının soğutucu akışkan

içermeleri ve sistemlerdeki ekserji yıkımları da tasarım ve çevresel değerlendirilmelerinde yer almalıdır. Dolayısı ile, %100 yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yönünde bu etmenler ön planda olup yenilenebilir enerji kaynaklarının da olabildiğince ekserji-akılcı kullanılması gerekmektedir. Bu olguyu daha iyi anlayabilmek üzere Küresel Isınma Olasılığı (*GWP*: Global Warming Potential) ve Ozon Tabakasını Seyreltim Olasılığı (*ODP*: Ozone Depleting Potential) arasındaki doğrusal ilişkiyi içeren, ayrıca atmosferde yıl olarak kalış sürelerini (*ALT*) de içeren yeni ve tümleşik bir eşitlik geliştirilmiştir.

$$ODI = \frac{pGWP^r}{(1-ODP)} \times \left(\frac{ALT}{1} \right)^s \quad \{ODP < 1\} \quad (1)$$

Burada *ODI* ozon tabakasını inceltme indeksi, *p*, *r*, *s* katsayıları sırası ile, 0.1, 0.03 ve 0.01 olup *r* değeri atmosfere salınan su buharının sera etkisini de içermelidir (1). Aslında su buharının sera gazı etkisi CO₂ veya metan gazının etkisinden daha fazladır. Eşitlik 2 de atmosfere salınan bir birim metan gazının yanında 2 birim su buharı salındığı görülmektedir ve NASA son olarak bu etkinin CO₂ den daha fazla olduğunu göstermektedir.



Ozon tabakası deliği kutuplarda daha fazla iken ekvator da atmosferdeki su buharının daha fazla olduğu, dolayısı ile her iki etkinin dünya atmosferinin bütününde birbirini tamamladığı ortaya çıkmıştır. Çizelge 1 de sıfır *ODP* değeri olduğu ileri sürülen F-gazın aslında *GWP* değerinin çok yüksek olması nedeni ile aslında ozon tabakasını inceltici etkisinin olduğu ve hatta CO₂ soğutucu akışkanından daha fazla *ODI* değerine sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 1. F-Gaz ve CO₂ Soğutucu Akışkanların *ODI* Değerlerinin Karşılaştırması.

Soğutucu Akışkan	<i>ODP</i>	<i>GWP</i>	<i>ALT</i>	<i>ODI*</i>
R744 (CO ₂)	0	1	120 yr.	0.115
R227ea (F Gaz)	0	3500	30 yr.	0.132

*Atmofere salınan su buharı etkisi katılmamış değerler.

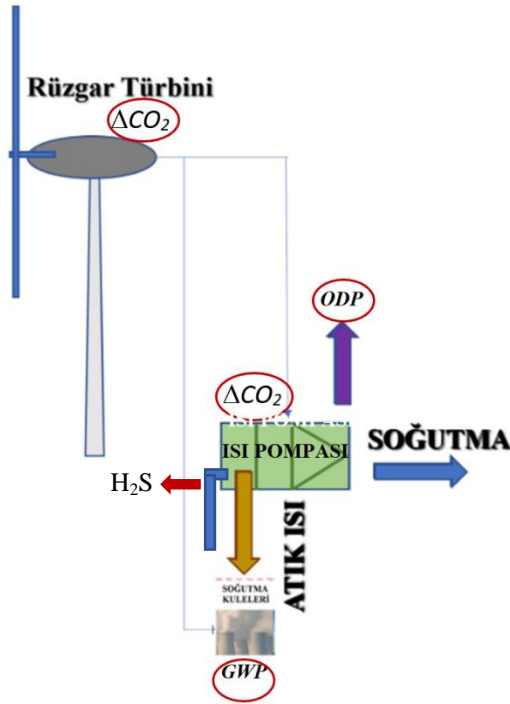
Uygulamadan somut bir örnek vermek gerekirse, “%100 yenilenebilir enerji kaynağı (Rüzgâr) ile ısıtma veya soğutma” amaçlanıyor ise kullanılacak bir toprak kaynaklı ısı pompasındaki soğutucu akışkanın ve dolaşım pompalarının sera etkileri ve rüzgâr türbini ve ısı pompası gibi sistemlerin yapımındaki gömülü enerji, ekserji ve CO₂ salımları göz önünde tutulduğunda rüzgâr enerjisinin %100 yenilenebilir olmasına karşın bu sistemin -sistem tabanında- %0 sera etkisine sahip olduğu söylenemez. Isı pompasındaki soğutucu akışkanın yıllık sızıntı oranı

(Yüzde olarak LR) ile ısı pompasına konulan soğutucu akışkanın (R) CO_2 karşılığı Eşitlik 3 de verilmiştir. Eşitlik 4 de ise ODP değerindeki salınım ile GWP değerindeki salınım arasındaki doğrusal ilişki gösterilmektedir. Burada Y değeri π sayısına eşittir.

$$CO_2 \cong \left(\frac{GWP}{1} \right) \left(\frac{LR}{100} \times R \right) \quad (3)$$

$$\Delta ODP = f\left(\frac{1}{Y}\right) \Delta GWP \quad (4)$$

Rüzgâr türbinin ve ısı pompasının yapımında ve malzemelerindeki ΔCO_2 gömülü salımları yanı sıra ısı pompasındaki soğutucu akışkanın ODP değerine ek olarak soğutma kulesinden salınan su buharının GWP karşılığının ötesinde, eğer ısı pompası jeotermal enerjiye dayalı ise jeotermal kuyu başında salınan CO_2 ve H_2S gazlarının da sera etkileri hesaba katılmalıdır. Çöp yakma eşdeğeri tabanında H_2S gazının CO_2 salım eşleniği 1.5 ile 0.17 arasındadır (2).



Şekil 1. Rüzgâr Enerjisi ile Çalışan bir Isı Pompasının Çevresel Etkileri (3)

Gömülü ekserji, enerji, gömülü CO_2 salımları rüzgâr türbini ve ısı pompası için Çizelge 2 de yaklaşık değerler olarak verilmiştir. Rüzgâr enerjisinin ısıtmada değerlendirilmesinde ekserji akılcılığı, ψ_R ekserji akış çubuğunda gösterilerek (Şekil 2) Eşitlik 5-a ve 5-b de hesaplanmıştır.

$$\psi_R = \frac{\mathcal{E}_{dem}}{\mathcal{E}_{sup}} \quad \{\text{Şekil 2: Ekserji önce yıkılırsa}\} \quad (5-a)$$

$$\psi_R = 1 - \frac{\varepsilon_{desT}}{\varepsilon_{sup}} \quad \{\text{Şekil 3: Ekserji sonra yıkılırsa}\} \quad (5-b)$$

$$\varepsilon_{desT} = \varepsilon_{des1} + \varepsilon_{des2} = [1 - (333 \text{ K}/566 \text{ K})] + [1 - (283 \text{ K}/313 \text{ K})] = 0.1778 \text{ kW/kW}$$

Çizelge 2. Bazı Malzeme ve Sistemlerin Gömülü Değerleri.

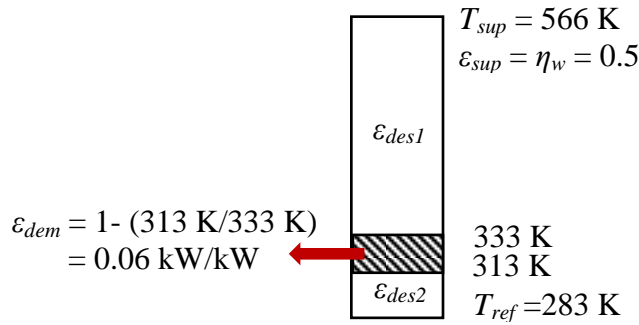
Malzeme veya Sistem	Gömülü Değerler				Toplam CO ₂ 3+5 kg/kg	ρ Yoğunluk kg/m ³	I Birim Fiyat ⁽²⁾ €/kg	
	Enerji, E_M MJ/kg (1 J=1 Nm)	CO ₂ kg/kg	Ekserji E_{XM} MJ/kg	ΔCO_2 ⁽¹⁾ kg/kg				
1	2	3	4	5	6	7	8	
Malzeme	Alüminyum, 20%	170	31.5	249	53.6	85.1	2720	2.4
	Rafine Bakır	99	9.7	80	8	17.7		
	Çelik	40	7.4	47	10.1	18.5	4500	2.7
	Kompozit Havacılık Kalitesi (Türbin Kanatları için)	315x 1600/32 10 ⁽⁴⁾	10.1	420 ⁽³⁾ x 1600/32 10 ⁽⁴⁾	80	90.1	1600 Fark 3210	23.2
Sistem	Rüzgâr Türbini ⁵ (1MW için)	55000 GJ	3000 ton	35700 GJ	5700 ton	8700 ton	-	1.3M€/MW
	PV (1 m ² için)	7500 MJ	550 kg	4500 MJ	720 kg	1270 kg	-	350 €/m ²
	PVT (1 m ² için)	10000 MJ	700	7000 MJ	1100 kg	1800 kg	-	475 €/m ²

¹ Ekserji yıkımlarından ötürü önlenebilir salımlar.

² Yarı sert Alüminyumun aynı mukavemet ve yoğunluk değerlerine göre uyarlanmış değerler.

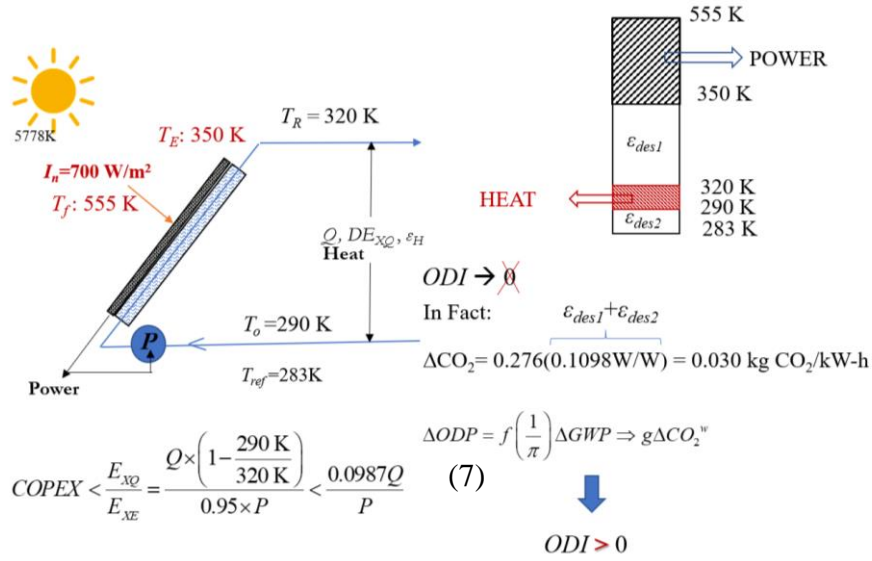
³ Tahmini, ⁴ Yoğunluk düzeltmesi

$$\Delta\text{CO}_2 = 0.267\varepsilon_{desT} \quad (6)$$



Şekil 2. Rüzgâr Enerjili Isı Pompasında Ekserji Akılcılığı

$\varepsilon_{sup} = 1 - (283 \text{ K}/566 \text{ K}) = 0.5 \text{ kW/kW}$ olup eşitlik 5-a dan ψ_R değeri $0.12 \times 5 = 0.6$ olarak bulunmuştur. Şekil 3 de ise gene “%100 yenilenebilir enerjiye dayalı” bir güneş enerjili PVT sisteminin sera gazı ve ozon tabakası sorumluluğu aynı yöntem kullanılarak gösterilmektedir. Eşitlik 5-b den ψ_R değeri 0.78 olarak bulunur.



Şekil 3. PVT Sisteminin Performansı ve Salım Sorumluluğu (4).

YENİ DEĞERLENDİRME ÖLÇÜTLERİ

Yukarıda verilen 1, 5 ve 6 eşitliklerine ek olarak ve ekserji tabanında olmak üzere güneş panellerinin değerlendirilmelerine yönelik iki ölçüt daha geliştirilmiştir olup Çizelge 3 de değişik panel türleri karşılaştırılmıştır. Bu çizelgeye göre en düşük ekserji düzeltili maliyet yeni tür bir PVT sistemi (5) için bulunmuştur:

$$ELC = \frac{PC \times EM}{\psi_R (A/W)} \quad (8)$$

$$TI = \eta_I \psi_R (1 - ODI) \quad (9)$$

PC bir panelin satış fiyatı, EM gömülü malzemeler ekserji maliyeti çarpanı, A panel yüzey alanı, W panel ağırlığıdır.

Çizelge 3. Değişik Güneş Paneli Türleri İçin Ekserji Düzeltli Panel Maliyeti.

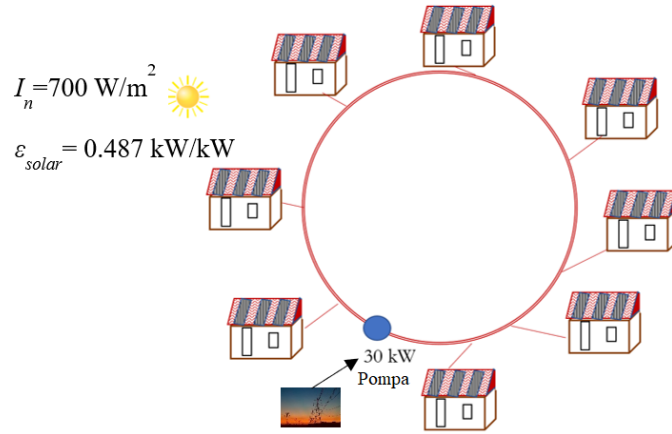
Değişken	Sistem			
	FPC (Düzlemsel Sıcak Su Toplacı)	PV	PVT	Isı Borulu, Faz Değişimli PVT
$PC, \text{€}/\text{kW}_{\text{pik}}$	1	2.5	2.9	3.3
A, m^2	1	1	1	1.2
W, kg	1.3	0.5	1.5	1.2
$EM, \text{€}/\text{kg}$	0.7	1.6	1.8	1.9
ψ_R	0.24	0.64	0.79	0.88
$ELC, \text{€}/\text{kW}_{\text{EXpik}}/\text{m}^2$	3.8	3.1	9.9	7.1
	FPC + PV yan-yana			
	15.2			

BULGULAR

Güneş Enerjisinin Bölgesel Paylaşımında karbonsuzlaştırma girişimleri bazen karbonlaştırma ile sonuçlanabilmektedir. Özellikle düzlemsel toplaçlı (FPC) sıcak su panellerinde elde edilen düşük entalpili sıcak suyun bir bölge ısıtma sisteminde yapılar arasında paylaşımı bu tür bir sonuç vermektedir. Şekil 4 de böyle bir uygulama gösterilmektedir.

i. Düzlemsel Toplaçlarda Elde Edilen Sıcak Suyun Bölgesel Paylaşımı

Bu uygulamada 50 benzer tek katlı konutun her birinin çatısındaki 10m² lik FPC sistemi tasarım koşullarında ve 320 K sıcaklıkta toplam 150 kW (Q) ısı üretmektedir. Bu durumda yapıların her biri üreten tüketici konumundadır.



Şekil 4. Güneş Enerjisinin Bölge Isıtma Sisteminde Paylaşımı (Düzlemsel Toplaçlar ile).

Elde edilen ısı bir sıcak sulu bölge ısıtma sisteminde yapılar arasında paylaşılmaktadır. Suyun sistemde dolaşımı 30 kW gücündeki pompa istasyonunda gerçekleştirilmektedir. Termodinamiğin 1. Yasasına göre bu sistemin tesir katsayısı (COP) 5 gibi yüksek bir değerdedir ve bu paylaşım oldukça avantajlı gözükmektedir.

$$COP = 150 \text{ kW} / 30 \text{ kW} = 5 \quad \checkmark$$

Halbuki konuya termodinamiğin 2. Yasası çerçevesinde baktığımızda ve çevre referans sıcaklığı 283 K alındığında ekserji tabanlı COP değerinin ($COPEX$) 1 değerinden çok daha düşük olduğu görülür.

$$COPEX = \frac{150 \left(1 - \frac{283K}{320K}\right)}{30 \times 0.95 \text{ kW/kW} + 10 \times 50 \times \frac{700}{1000} \times 0.487} = 0.087 \quad \triangle$$

$COPEX$ değerinin 1 değerinden den az olması demek önlenbilir CO₂ sorumluluğu demektir:

$$\Delta CO_2 = 0.267 \varepsilon_{des} \approx 0.267(1 - COPEX) = 0.24 \text{ kg CO}_2/\text{kW-h}_{isi}$$

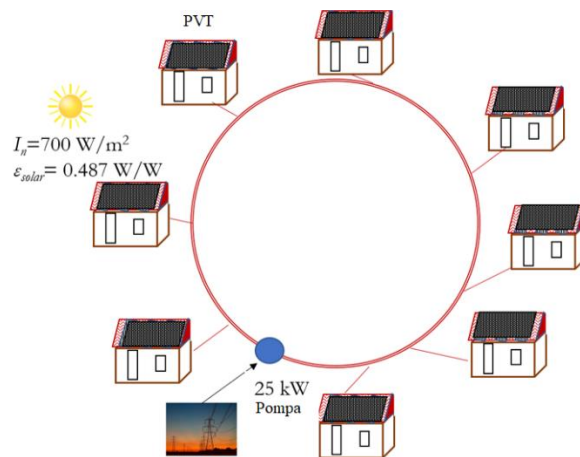
Saatlik sorumluluk tasarım koşullarında $Q = 150 \text{ kW}_{isi} \times 0.24 = 36.5 \text{ kg CO}_2/\text{saat}$ mertebesindedir. Ayrıca, 30 kW gücündeki pompa istasyonunun bir saat boyunca gerek duyduğu elektrik gücü şebeke elektriğinden karşılanıyor ve bu elektriğin %65'inin termik santrallerden elde edildiği bir durumda ulusal elektriğin karbon ayak izi de yaklaşık olarak aşağıdaki yöntemle bulunur:

$$CO_2 = \left(\frac{0.4 \times 30}{\eta_{EL} \eta_T} \right) = 47 \text{ kg CO}_2/\text{saat}$$

Burada, $0.4 \text{ kg CO}_2/\text{kW-h}$ değeri, ilkemizdeki doğal gaz ve kömür santrallerinin ortalaması olarak kabul edilmiş birim yakıt CO_2 salım değeridir. Bu hesapta, elektrik motorları ve pompa toplam verimi (η_{EL}) 0.85 ve şebekede toplam güç üretim verimi (η_T) 0.30 alınmıştır. Görüldüğü üzere, bu “%100 yenilenebilir” uygulamada tamamen göz ardı edilen önlenebilir saatlik CO_2 salım miktarı gerçek salım miktarına oldukça yakındır ve bu sistem toplamda $83.5 \text{ kg CO}_2/\text{saat}$ salımdan sorumludur. Durumun düzeltilmesi için FPC sistemi PVT sistemi ile değiştirilebilir veya saydam PV katmanları FPC yüzeylerine eklenebilir (Şekil 5).

ii. Bölgesel Sistemde Düzlemsel Toplaç Yerine PVT Kullanımı

PVT sisteminde sıcak su üretimi azalmış (120 kW), fakat 45 kW elektrik üretilmiştir. Pompa talebi de 30 kW dan 25 kW a inerek $COPEX$ değeri 0.274 değerine yükselmiştir. Dolayısı ile bu sistemin işletmesindeki toplam CO_2 salımı da $62.6 \text{ kg CO}_2/\text{saat}$ değerine inmiştir.



Şekil 5. Güneş Enerjisinin Bölge Isıtma Sisteminde Paylaşımı (PVT Sistemler ile).

Ancak 150 kW-120 kW ısı farkının yoğunlaşmalı bir doğal gaz kazan sisteminden karşılandığı (ortalama verim 0.9) düşünülürse saatlik salıma 13.3 kg CO₂/saat eklenmesi gerekliliği yanı sıra bu ek sistemin ε_{des} değerinin de yaklaşık 0.85 ($COPEX = 0.15$) olduğu göz önünde tutulduğunda 33.5 kg CO₂/saat daha eklenmesi gerekir ki bu seçeneğin toplam salımı daha fazla olmaktadır (109.4 kg CO₂/saat). Bu sonuç termodinamiğin 2. Yasasının uygulanmadığı durumlarda çok yanlış çözümlere gidilebileceğini göstermektedir. Bu tür bir sistemin pompa ekserjisi ile bölgede paylaşılan ısının toplam ekserjisinin (E_{XH}) başa-baş noktası aşağıdaki eşitlikten bulunabilir:

$$L_{max} < \frac{E_{XH}}{\Delta P_S (0.95)} \quad (10)$$

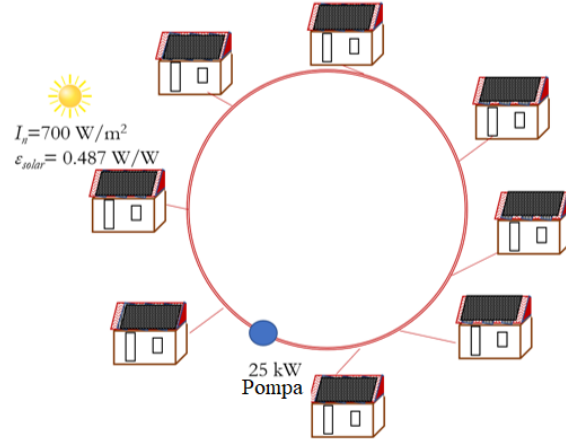
Bölgede dolaştırılan 120 kW ısı ekserji ile birim ana boru hattındaki basınç kayıp ekserjisi ΔP_S oranından en fazla boru hattı uzunluğu, L_{maks} hesaplanabilir. Örneğin ΔP_S 0.007 kW/m ise:

$$L_{maks} < [120 \times (1-283 \text{ K}/320 \text{ K})]/[0.007 \times 0.95] = 2086 \text{ m.}$$

Bu örnekte ana boru hattı uzunluğu 2 kilometreyi geçmemelidir. Daha uzun bir parkur için boru çapı büyütülebilir ancak bu yöntem boru ve yatırım maliyeti gömülü değerleri de arttıracaktır.

iii. PVT elektriğinin Pompa Tahrikinde Kullanımı

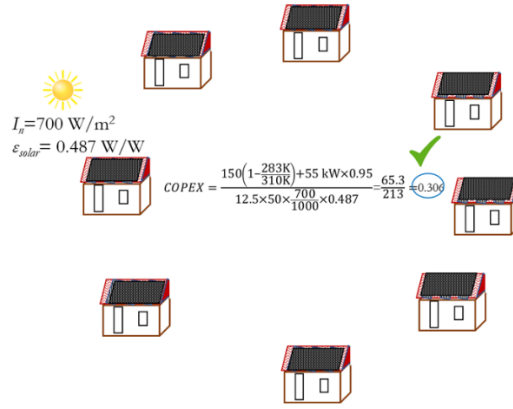
Bir ileri adım olarak üretilen elektriğin pompada kullanılarak yapılardaki elektrik güç talebinin arta kalan bölümünün şebekeden karşılanması düşünülebilir (Şekil 6). Bu durumda beklenmedik biçimde $COPEX$ azalmakta (0.173) buna karşın toplam CO₂ salımı biraz azalmaktadır (68 kg CO₂/saat). Ancak, yoğunlaşmalı kazanın sorumlulukları eklendiğinde toplam değer 114.8 kg CO₂/saat değeri ile (ii) şıkkından önemli bir fark göstermemektedir.



Şekil 6. PVT Sistemlerinin Pompa Talebini Karşılması.

iv. Bölgesel Sistemden Vazgeçiş

Son olarak bölge ısıtma sisteminin terk edildiği duruma da bakmak gerekir: her yapı kendi PVT sistemini kullanmakta ve elektrik güç ve ısı taleplerini karşılamaktadır ve 50 yapının toplamda sadece önlenbilir CO₂ salım sorumluluğu bulunmaktadır (9.26 kg CO₂/saat). Bireysel sistemde eşzamanlılık fazla olduğundan elektrik ve ısı depolamasına daha çok gerek duyulacaktır.



Şekil 7. Bölgesel Isıtma Sistemimden Vazgeçiş (Bireysel Sistemler).

Yukarıdaki örneğin bu son seçeneğinde görüldüğü üzere, literatürde ve uygulamada özellikle güneş enerjili uygulamalarda giderek kabul gören çok düşük sıcaklıklardaki bölge ısıtma sistemlerinde (5DH: Low-Exergy Buildings in Low-Exergy District), düşük ekserjili ısı paylaşımı ile pompajın yüksek ekserjili elektrik talebi arasındaki dengesizlik giderek artmaktadır. Kaldı ki bu dengesizlik bölge ağında düşük sıcaklıklarda dolaşan akışkanın daha hızlı dolaştırılması gerekmektedir. Bu da pompaj talebinin daha da artmasına neden olur. Her ne kadar bu olumsuzluk daha büyük boru çapları, kısa boru hatları, ve uydu alt bölge istemleri

kullanılarak bir ölçüde önlenebilirse de bu kez ortaya çıkacak ek maliyetler ve gömülü CO₂, gömülü ekserji miktarları artacaktır. Tüm bu nedenlerle sistemin çok iyi bir biçimde ve 2. Ysa çerçevesinde optimize edilip değerlendirilmelidir.

YENILENEBİLİR ENERJİNİN DEPOLAMASI

Yenilenebilir enerji kaynakları kesintili olduğunda rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji birlikte ve melez bir sistem olarak değerlendiriliyor olsa da depolamaya gerek vardır. Danimarka rüzgâr enerjisinin fazlasını ertesi gün bölge ısıtmasında kullanmak üzere elektrik dirençli kazanlarla ısıya dönüştürmektedir. Bu yöntem ekserji akılcılığı olarak an olumsuz çözümdür. Bataryaların 100 kat daha pahalı bir depolama yöntemi ve çevreye daha zararlı olduğu bilinse de bu olgu tek başına bir gerekçe olmaz. Termodinamik açıdan elektrik mümkün olduğunca elektrik olarak, ısı ise ısı olarak değerlendirilmeli soğutma ise adsorpsiyon veya absorpsiyon sistemleri ile en sonda ve gerekirse ısı pompası destekli biçimde, soğuk su veya buz tankı depolaması ile gerçekleştirilmelidir. Bu bağlamda daha akılcı çözümler aşağıda verilmiştir. Ayrıca basınçlı hava ve pompajlı gölet sistemleri de literatürde ve tezlerde incelenmiş bulunmaktadır (6,7)

i. Elektriğin Sıcak Suya Dönüştürülüp Depolanması

$$\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{sup}}\right) \eta_{TES} > ? 0.95 \eta_{EL} \quad (11)$$

Burada T_{ref} 283 K alınmaktadır. T_{sup} ise elde edilen sıcak suyun depo çıkışındaki sıcaklığıdır. η_{TES} sıcak su depolama verimi, 0.95 kW/kW elektrik gücünün birim ekserjisi, η_{EL} ise elektrik depolamasında batarya net verimidir. Eşitlik 11 örnek verilerle çözümlendiğinde ekserji akılcılığı (Sol taraf bölü sağ taraf) 0.26 olmaktadır.

ii. Elektriğin Sıcak Suya Isı Pompası Kullanılarak Dönüştürülüp Depolanması

$$COP \times \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{sup}}\right) \times \eta_{TES} \geq ? \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \times 0.95 \times \eta_{EL} \quad (12)$$

Isı pompasının COP değeri su üretim sıcaklığı T_{sup} ile ve kaynak sıcaklığı T_g ile bağlantılıdır. Eşitlik 13 deki a ve b katsayıları ısı pompasının doğrusal biçimdeki özgün değerleridir.

$$COP = a - b(T_{sup} - T_g) \quad (13)$$

iii. Elektriğin Buhara Dönüştürülüp Depolanması

$$\eta_s \times \eta_{TES} \eta_T \geq ? 0.95 \times \eta_{EL} \quad (14)$$

iv. Elektriğin Hidrojen Eldesi ile Depolanması

Bu yöntemde güneş enerjisi ve/veya rüzgâr enerji kullanılarak elde edilen elektriğin anlık talep fazlası elektroliz yolu ile hidrojen gazına dönüştürülüp depolanmaktadır. Talep arttığında ise hidrojen, yakıt pilinde tekrar elektriğe dönüştürülmekte ve artık ısı da ayrıca bölge enerji sisteminde ısı pompalı veya ısı pompasız olmak üzere değerlendirilmekte. Elektrik enerjisinin Hidrojen gazına dönüşümü, depolanması ve sonrada tekrar elektrik ve ısıya dönüşümündeki toplam verimler sırası ile X ve Y olarak tanımlandığında ve (ii) şıkki ile mukayese edildiğinde:

$$COP \times \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{sup}}\right) \times \eta_{TES} \geq ? X \times 0.95 + Y \times \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_{FC}}\right) \quad (15)$$

Burada T_{FC} yakıt pilinin sağladığı yan ürün olan ısının (artık ısı) sıcaklığıdır. Eşitlik 15 in sol tarafına elektrik gücünün birim ekserjisi (0.95 kW/kW) konulduğunda bu depolama yönteminin akılcılığı $X = 0.60$ ve $Y = 0.15$, $T_{FC} = 320$ K değerleri için 0.62 olarak bulunur. Bu değer optimum noktada 0.85 mertebesine çıkabilir. Uygulamada karşılaşılan örnek veriler ve bu makaledeki eşitlikler kullanılarak Çizelge 4 hazırlanmıştır.

Çizelge 4. Değişik Depolama Yöntemlerinin Karşılaştırması

Depolama Yöntemi	1. Yasa Verimi, η_I	COP	ψ_R	ε_{des} kW/kW	ΔCO_2 kg/kW-h	ODI	TI
Elektrikten Sıcak Suya	0.8	1	0.12	0.94	0.25	0	0.1
Elektrikten Isı Pompalı Sıcak Suya	0.8	5	0.60	0.25	0.06	0.1	0.4
Elektrikten Buhara, Türbinden Elektriğe ve Yoğuşma Isısına	0.55	-	0.75	0.20	0.053	0.05	0.4
Elektrikten Hidrojene, Yakıt Pilinden Elektriğe ve Artık Isıya	0.75	-	0.83	0.10	0.027	0.05	0.6

TARTIŞMA VE SONUÇ

Çizelge 4 de görüldüğü üzere zaten kritik olan düşük ekserjili güneş enerjisi bölge sistemlerinde enerji depolamasının seçimi ve tasarımı daha da önem kazanmaktadır. Foto-voltaik sistemlerde ise bataryalarda enerji depolaması elektrikten-elektriğe doğrudan geçiş anlamında cazip gözükse de şu anki maliyetler sıcak sulu depolamaya göre 100 kat fazladır.

Ancak sıcak sulu sistemlerde ΔCO_2 fazladır ve ekserjinin en az %90 ı yıkılmaktadır. Bu olgu işletimde çevre sorunu ve küresel ısınma anlamı taşır. Buna karşılık bataryaların gömülü ekserjisi ve CO_2 salımları çok yüksektir ve geri dönüşümleri de zordur. Bu nedenle bugünkü koşullarda her projede taleplere ve maliyetlere bakarak çevre ve maliyet açısından bölgedeki talep türlerine de bakarak bir optimum melezleşmeye gidilebilir. Bunun yerine Çizelge 4 de en uygun çözümün *TI* değeri en yüksek olan (0.6) hidrojen ekonomisi olduğu anlaşılmaktadır (8). Bu sonuç güneş, rüzgâr ve hidrojen birlikteliğine işaret etmektedir.

KAYNAKÇA

- (1) Kılıkış, B. 2019. Exergy: Game Changer or Game Maker, Paper submitted to CLIMA 2019 Conference, 26-29 May, Bucharest, Proceedings.
- (2) Jo, G., Amin K., Jang J., Byeon, E., Jang, Y., ve Yang G. 2015. The Effects of Malodorous Substances from Municipal Solid Waste (MSW) to Climate-Change as Greenhouse-Gas: Calculating GWP of Hydrogen Sulfide, 26th Annual Conference of JSMCWM, 2015 FA 2.
- (3) Kılıkış, B. 2019. The Importance of Exergy Rationality and Storage For 100% Renewable Targets in Decoupling Sustainable Development and Ozone Depletion, UNIDO Ozone Conference, Presentation, 16-17 Eylül, Antalya.
- (4) Kılıkış, B. 2019. An Exergy-Based Holistic Urban Development Model for The Distance Limit Between a Renewable Energy Plant and Its Low-Exergy District, 14. SDEWES Konferansı, 1-6 Ekim, Dubrovnik.
- (5) Kılıkış, B. 2019. Development of a Composite PVT Panel with PCM Embodiment, TEG Modules, Flat-Plate Solar Collector, and Thermally Pulsing Heat Pipes, Solar Energy Journal, Basımda.
- (6) Cenan, M. 2013. Türkiye de Basınçlı Hava Ortamında Enerji Depolamasının Olurluluğunun Teknik ve Çevresel İncelemesi, Y. Lisans Tezi, Başkent Ü. Ankara.
- (7) Değer, K. 2013. Pompajlı Hidroelektrik Santraller ve Rüzgâr Enerjisi Santralleri Melez Sistemleri, Y. Lisans Tezi, Başkent Ü. Ankara.
- (8) Kılıkış, B. Be Kılıkış, Ş. 2018. Hydrogen Economy Model for Nearly Net-Zero Cities with Exergy Rationale and Energy-Water Nexus, *Energies*, 11, 1226.

ÖZGEÇMİŞ

Birol 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 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 Kılıkış, 1999 da ODTÜ Makine Müh. Bölümü Profesör kadrosundan emekli oldu. ASHRAE nin değişik teknik komitelerinde görevlidir. 2003 yılında uluslararası başarılarından dolayı ASHRAE Fellow üyeliğine yükseltlen Kılıkış 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 çözümlenleri 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. Halen Avrupa Birliği *Renewable Heating and Cooling Platformu* Başkan Yardımcılığı görevini yürütmektedir.