



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

DÜŞÜK EKSERJİLİ BİNALARDA GÜNEŞ VE RÜZGÂR ENERJİSİ İLE BİRLİKTE ISI VE GÜÇ ÜRETİM SENARYOLARI

BİROL KILKIŞ
BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ

ŞİİR KILKIŞ
TÜBİTAK



DÜŞÜK EKSERJİLİ BİNALARDA GÜNEŞ VE RÜZGÂR ENERJİSİ İLE BİRLİKTE ISI VE GÜÇ ÜRETİM SENARYOLARI

Cogeneration of Heat and Power Scenarios with Wind and Solar Energy in Low-Exergy Buildings

Birol KILKIŞ
Şiir KILKIŞ

ÖZET

Bu makalede düşük ekserjili binalarda rüzgâr ve güneş enerjisinin yenilikçi güneş topaçları ile tümleşik kullanımının önemine değinilmekte, bu bağlamda termodinamik yararlar hesapsal olarak belirtilmektedir. Hesaplar ayrıca akılcı ekserji yönetim modeli ile de pekiştirilmiştir. Düşük ekserjili bir konutun tüm ekserji ve enerji taleplerinin karşılandığı ısı pompası destekli ve desteksiz iki senaryo sunularak tümleşik güneş enerjili sistemler tanıtılmış ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr türbini, ekserji çözümlemesi, Sıfıra Yakın Net-Ekserji Binası, Akılcı Ekserji Yönetim Modeli, Düşük Ekserji Binası, PVT, REMM, Isı pompası

ABSTRACT

In this paper the importance of combining innovative solar collectors and wind turbines in Low-Exergy Buildings is emphasized. In this respect, thermodynamic benefits are given in mathematical terms, which is supported by the Rational Exergy Management Model (REMM). Two scenarios, namely one with heat pump assistance and the other without heat pump assistance are presented, where all thermal and power loads are satisfied with an optimum combination of solar and wind energy and systems. The overall REMM efficiencies are presented and discussed.

Key Words: Wind turbine, exergy analysis, Nearly-Net Zero-Exergy Building, Rational Exergy Management Model, LowEx building, PVT, REMM, heat pump

GİRİŞ

Ekserjiyi kullanıyoruz fakat enerjiye para ödüyoruz
Dr. Peter Novak, ASHRAE 2007

Ekserji belli bir enerji kaynağının veya enerji akısının yararlı işe dönüştürülebiyecek kısmını ifade eder. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliğine karşın bunların eş zamansızlığı, çoğu kez eş konumsuzluğu, çoğunun da kesintili ve düşük ekserjili olmaları nedeni ile en iyi ve etkin çözümlere ulaşmak oldukça zordur. Değişik yük taleplerine karşın daha hassastırlar. Bu nedenlerle yenilenebilir enerji kaynaklarının en etkin ve verimli bir biçimde harmanlama işlemi arz ve talep ekserji farklılıklarına ve yük dalgalanmalarına geleneksel sistemlere oranla daha duyarlıdır.

Enerji mi Ekserji mi?

Dr. Peter Novak ın yukarıdaki özdeyişi bize bugünkü ulusal enerji bilançomuzda yenilenebilir enerji kaynaklarımızın sürdürülebilirliği, en etkin ve yaygın kullanımı ve ekonomikliği açılarından enerji ve ekserji kavramlarının, diğer bir deyişle, Birinci ve İkinci Yasalardan hangisinin daha önemli ve öncelikli olduğunun önemli bir ipucunu vermektedir [1]. Tükettiğimiz elektrik enerjisinin her kW saati (kW-h) için ve doğal gazın her metre küpü için bir bedel ödüyoruz ama bu enerji kaynaklarının hangi oranda yararlı işlerde kullanabildiğimizi sorgulamıyoruz. Daha da önemlisi, çeşitli enerji kaynaklarımızın ülkemizdeki sektörel tüketimi ve değerlendirmeleri açısından önceliklerini ve akılcı seçeneklerini nitelik (kalite) ve nicelik (miktar) tabanında en uygun paylaşımının, en uygun sektörlerde değerlendirilmelerinin gereğini önemseyemediğimizi söyleyemeyiz. Yenilenebilir enerji kaynaklarımızın birincil enerji kaynakları yanında hangi karışımda, harmanlama ve kümelenmedeki bağlaşımlarının en akılcı olacağını teknik ve bilimsel olarak mercek altına aldığımızı da pek söyleyemeyiz. Enerji ekonomisi, enerji stratejileri ve enerji planlaması dediğimizde enerjinin sadece niceliğini hesaba katıyoruz, enerjinin niteliğini göz önünde bulundurmuyoruz. Örneğin, doğal gazı sadece konfor ısıtmasında mı kullanmalıyız, yoksa sadece elektrik gücü üretmekte mi kullanmalıyız, yoksa birleşik ısı ve güç (kojenerasyon veya trijenerasyon) sistemlerinde mi değerlendirmeliyiz?

Diğer bir örnek ise, zaten kısıtlı ve verimli tarım arazisinde güneş enerjisi hasat edeceksek bunun tipi ve çıktılarının ne olmasının çok kapsamlı bir eniyileme (optimizasyon) çalışması ile ortaya çıkarılması zorunluluğudur. Güneş enerjisinin herhangi bir yörede sadece elektrik gücü üretiminde mi değerlendirileceği, üretilen gücün nerede, nasıl ve ne zaman kullanılacağı, Foto Voltaik gözeleri ile güç üretimi mi yoksa yoğunlaştırıcı veya odaklayıcı toplaçlarla önce buhar daha sonra elektrik gücü ısı gücü üretiminin daha mı akılcı olacağı gibi anahtar soruların cevaplarını vermek oldukça zordur. Türkiye'nin değişik iklim bölgelerine ve güneşlenme koşullarını da gözetir biçimde geçerli formülasyonlar yoktur. İşte Ülkemiz için hayati öneme sahip bu gibi karar verme aşamalarında enerjinin niceliği ön plana çıkmaktadır. Bu ön plana çıkışın diğer bir etmeni de yenilenebilir enerji kaynaklarının genellikle düşük yoğunluklu, düşük entalpili ve kesintili oluşlarıdır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının ortalama ekserjileri düşüktür. Bu düşük ekserjili kaynakların akılcı kullanımında düşük ekserjili taleplerle eşleştirilmeleri ön koşuldur. Bu eşleştirme ise ancak enerjinin niceliği de göz önünde tutulduğunda gerçekleşebilir.

Eğer Q simgesi ısı gücün veya ısının niceliğini temsil ediyor ise, T_f (Enerji kaynak sıcaklığı) ve T_{ref} (Çevre denge sıcaklığı) sıcaklıkları arasındaki ideal Carnot çevrimi tabanında E_{xmaks} faydalı güce veya işe dönüşebilme potansiyelidir:

$$E_{xmaks} = \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_f} \right) Q \quad (1)$$

Örneğin, doğal gazın serbest ortamdaki alev sıcaklığının 2000 K ve çevre denge (Referans) sıcaklığının da 283 K (10°C) olduğu kabul edilirse doğal gazın alt ısısının en fazla (ideal olarak) % 86 lık bir bölümü yararlı işe dönüşebilir:

$$E_{xmaks} = \left(1 - \frac{283}{2000} \right) Q = 0,86Q$$

Geri kalan ısı ise o sürecin sürdürülebilirliğini, kısacası çevrimin tekrarını teminen çevreye atılmak durumundadır.

Gerçek uygulamalarda ekserji ideal E_{xmaks} dan daha küçüktür:

$$E_x \leq E_{xmaks} \quad (2)$$

Niceliği aynı olan yani miktarı Q olan diğer bir enerji kaynağının sıcaklığı (örneğin sıcak su) 333 K (60°C) ise, $E_{x\text{maks}}$ değeri sadece,

$$E_{x\text{maks}} = \left(1 - \frac{283}{333}\right)Q = 0,15Q \text{ dur.}$$

Birim Q değerine karşılık gelen birim ekserji değeri, ε gene ideal Carnot Çevrimi ile tanımlanır:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_f}\right) \times (1) = \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_f}\right) \quad (3)$$

Demek ki enerjinin niceliği enerji kaynaklarının akılcı kullanımında tek başına bir ölçüt olamaz. Önemli olan sadece enerjinin miktarını tasarruf etmek değil daha önemlisi enerjinin niteliğini akılcı kullanmaktır. Çünkü yıkılan ekserjinin geri dönüşü yoktur (irreversible), o bir fırsattır, yararlı iş potansiyeli ya akılcı olarak uygun işlerde uygun zamanda uygun sektörlerde ve yerlerde kullanılır veya o fırsat kaçırılır (ekserji yıkılır), bir daha da geri gelmez.

Ayrıca, güneş gözesi verimi genelde %20 düzlemsel toplaç verimi %60 ve üstü bile olabilir (Birinci Yasaya göre). Bu yasaya göre sanki düzlemsel toplaç daha verimli ve ülkeye katma değeri daha fazla olacakmış gibi gözükabilir. Nitekim, Dünyada düzlemsel toplaç uygulamalarında dördüncü sırada olmakla öğünmekteyiz. Bakalım gerçek böyle mi?

800 W/m^2 ışınım altında 333 K sıcaklıkta sıcak su üreten düzlemsel toplaçın Birinci Yasa verimi 0.80 olsun. Bu durumda 1 m^2 yüzeye sahip bir düzlemsel toplaçın ulusal katma değeri hesaplanabilir:

$$\text{Düzlemsel Toplaç (DT): } 1\text{m}^2 \times 0,80 \times 800 \times (1-283/333) = 96.1 \text{ W}$$

Aynı yüzeyde güneş gözesi olduğunda bu katma değer:

$$\text{Güneş Gözelerinden Oluşan Panel : } 1\text{m}^2 \times 0,20 \times 800 \times 0,95 = 152 \text{ W}$$

Burada 0.95 W/W elektrik gücünün en fazla olabilecek birim ekserjisidir.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{283}{5778}\right) = 0,951 \text{ W/W} , \quad (4)$$

Bu hesapta, 283 K çevre referans sıcaklığı, 5778 K ise fotonların saçıldığı güneş yüzey sıcaklığıdır. Genelde elektrik gücünün birim ekserjisi bir sayısına da yuvarlatılmaktadır.

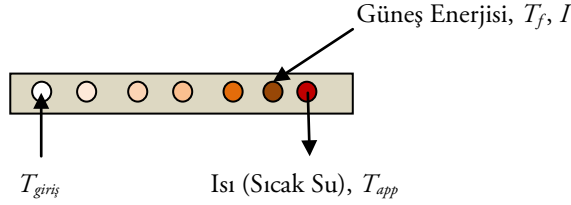
Bu aşamada E_x değerinin ötesinde Akılcı Ekserji Yönetim Verimi kavramına başvurmak gerekir [2]. Bu bağlamda ekserjinin yararlı işe çevrilen bir uygulamadan veya uygulamalardan önce mi yoksa sonra mı yıkıldığının ayırdı önemlidir.

Ekserji yararlı uygulamadan önce yıkılırsa:

Bazı uygulamalarda söz konusu yararlı uygulamayı gerçekleştirmek üzere sunulan ekserjinin bir bölümü bu uygulamadan önce yıkılır. Eğer güneş enerjisinden güç üretmek yerine sadece ısı, örneğin sıcak kullanım suyu üretilirse, faydalı iş potansiyeli sıcak suya oranla daha fazla olan güç üretme fırsatı kaçılmış olur. Bu dengesizliğin ölçütü **Akılcı Ekserji Yönetimi Verimi, ψ_R** dir:

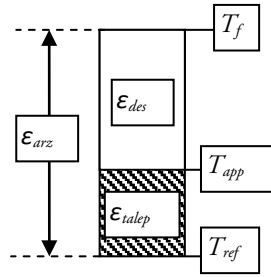
$$\psi_R = \frac{\mathcal{E}_{talep}}{\mathcal{E}_{arz}} \quad \{\psi_R \leq 1\} \quad (5)$$

Bu koşulun örneği güneş enerjili düzlemsel sıcak su toplacıdır (**DT**). Uygulamayı ve sistemi ekserji yönünden ve ideal Carnot çevrimi tabanında tanımlamak üzere önce söz konusu uygulamayı sıcaklık (gerçek veya sanal) ölçeğinde temsil etmek üzere bir **Ekserji Akış Çubuğu** çizilir. Bu uygulamada ekserji önce yıkılmaktadır. Burada ele alınan ekserji yıkımları **sistemik** yani sistemin işleyişi ile ilgili temel (ana: major) ekserji yıkımlarıdır. Ekserji yıkımı kısaca bir süreç içerisinde değerlendirilemeyen ekserjilerin toplamıdır (Exergy destruction).



Şekil 1. Ekserjinin yararlı işten öncesinde yıkıldığı düzlemsel güneş toplacı (**DT**) uygulaması.

Sistemin işleyişi ile ilgili süreçlerin kaçınılmaz (borulardaki sürtünmeler, ısı kayıpları gibi) olan ikinci ekserji kayıpları yani **süreçsel** ekserji yıkımları göz ardı edilmektedir. Sistemik ekserji yıkımının (Şekil 2 de beyaz alan) süreç içerisinde en önce yer aldığı ve ekserjinin yararlı bir talep veya taleplerde kullanıldığı taralı alan(lar)ı belirleyen sıcaklıklar ölçeğinde gösterildiği Ekserji Akış Çubuğu Şekil 2 da gösterildiği gibidir. Söz konusu Şekilde görüldüğü gibi T_f güneş enerjisinin ideal Carnot çevrimi tabanındaki eşdeğer (sanal) sıcaklığıdır ve toplaç yüzeyindeki dik ışınım şiddeti I (W/m^2) ya bağlıdır (Eşitlik 6).

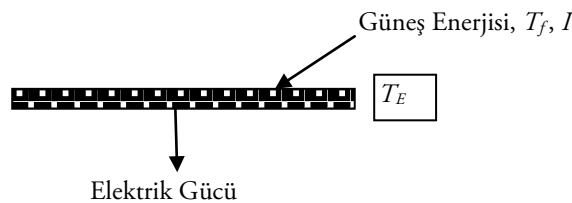


Şekil 2. Ekserjinin önce yıkıldığı bir uygulamada **Ekserji Akış Çubuğu** [3]

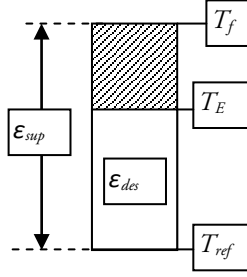
$$\frac{I}{1366} = \frac{\left(1 - \frac{T_{ref}}{T_f}\right)}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{5778K}\right)} = \frac{\epsilon_{güneş}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{5778K}\right)} \quad (6)$$

Ekserji yararlı uygulamadan sonra yıkılırsa:

Bu tür uygulamaya en güzel örnek güneş gözesidir. Bu uygulamada ilkin elektrik gücü üretilmekte, ekserji bu yararlı üretimden sonra ise başka bir yararlı işte kullanılmaksızın yıkılmaktadır. Isınan güneş gözelerinin ısısından yararlanılsa idi bu uygulamada ekserji yıkımı azalacaktı. Böyle bir ikinci uygulama yapılmayıp sadece elektrik gücü üretilirse sistem aşağıdaki şekilde benzetilebilir. Burada T_E simgesi güneş gözelerinin oluşturduğu panelin yüzey sıcaklığıdır. Bu koşulu temsil eden ekserji akış çubuğu aşağıda gösterilmiştir. Burada ϵ_{des} yararlı işte kullanılmayıp yıkılan ekserji miktarını simgelemektedir.



Şekil 3. Güneş gözeleri ile güneş enerjisinden elektrik gücü eldesi.



Şekil 4. Güneş gözeleri ile elektrik gücü eldesinin Ekserji Akış Çubuğu.

Ekserjinin yararlı uygulamadan sonra yıkıldığı durumda Akılcı Ekserji Yönetim Verimi Eşitlik 7 den bulunur.

$$\psi_R = 1 - \frac{\varepsilon_{des}}{\varepsilon_{arz}} = 1 - \frac{1 - \frac{T_{ref}}{T_E}}{1 - \frac{T_{ref}}{T_f}} \quad (7)$$

Örnek:

$I = 800 \text{ W/m}^2$, $T_E = 110^\circ\text{C}$ (383K), $T_{ref} = 283 \text{ K}$. Belirli koşullarda ve belli bir PV modeli için, $\eta_1 = 0,2$. Eşitlik 1-2 den $T_f = 639 \text{ K}$ ve $\varepsilon_{arz} = 0,557$. Eşitlik 1-5 den:

$$\psi_R = 1 - \frac{\varepsilon_{des}}{\varepsilon_{arz}} = 1 - \frac{1 - \frac{283}{383}}{1 - \frac{283}{639}} = 0,53$$

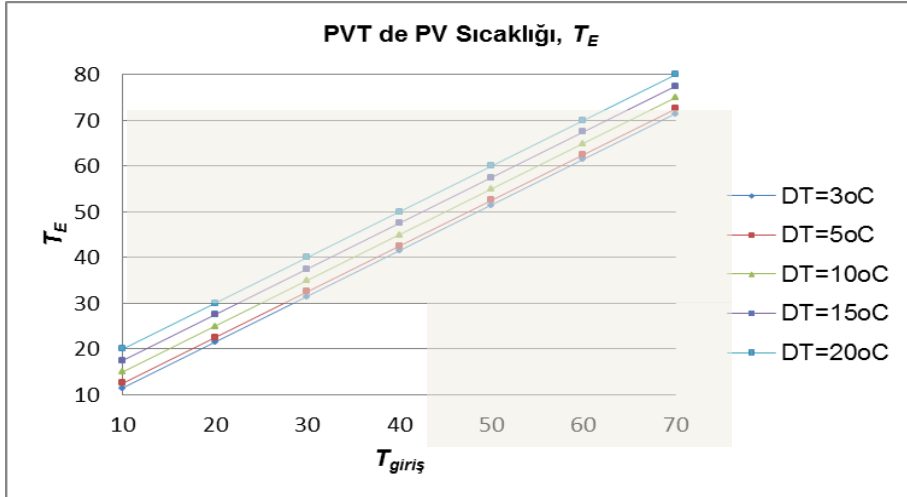
Güneş gözesinin akılcı ekserji yönetim verimi düzlemsel toplaca göre çok daha yüksektir. Güneş gözesinin aynı güneş ışınımı altında toplam ekserjisi $1 \text{ W/W} \times 0,2 \times 800 \text{ W/m}^2 = 160 \text{ W/m}^2$, düzlemsel sıcak su toplacının ise $0,15 \times 0,65 \times 800 \text{ W/m}^2 = 78 \text{ W/m}^2$ tır. Bu iki örnekten güneş gözelerinin birim metre-kare başına iki kat daha fazla ekserji sağladığı ortaya çıkmaktadır. Buna paralel olarak da düzlemsel toplaç benzer oranda ekserji yıkılmış olmaktadır.

Bu örnekten güneş enerjisinin değerlendirilmesinde akılcı ekserji veriminin güneş gözesi lehine arttığı görülmekte ise de bu uygulama yeterince akılcı mıdır? Hayır, hala tam akılcı değildir. Güneş gözesinde elektrik gücü üretildikten sonra ekserji başka bir yararlı uygulamada değerlendirilmeksizin yıkılmaktadır.

DT ve **PV** örneklerinin bir arada yorumlandığı Güneş Enerjili Birleşik Üretim (PVT) cihazı bize daha akılcı bir seçenek sunmaktadır. Bu karma cihaz yukarıda sözü edilen,

- 1- Düzlemsel toplaç ve
- 2- PV gözelerinin

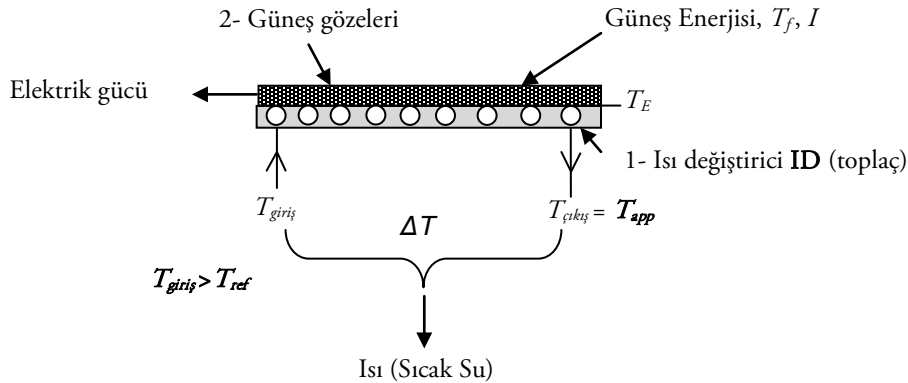
bir sentezidir. Bu sentezde düzlemsel toplaç görevini üstlenen ısı değiştiricinin giriş ve çıkış suyu arasındaki sıcaklık farkı büyük ise ve giriş suyu ılık ise güneş gözeleri fazla soğutulamaz ve gene verimleri düşük kalır. Güneş gözelerinin etkin soğutulması için talep sıcaklığının düşük giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları arasındaki fark da küçük olmalıdır. Bu nedenle PVT sistemleri açık devreli sistemler için daha uygundur. Örneğin 90°C - 70°C arasında ($DT = 20^\circ\text{C}$)kapalı bir ısıtma devresi yerine soğuk suyun girip sıcak su olarak çıktığı ve devredeki giriş çıkış suyu arasındaki sıcaklık farkının küçük olduğu durumlarda sistem PV nin etkin soğutulması bakımından daha avantajlı olmaktadır. Sonucu koşul için devredeki debisini yüksek olması da gerekebilir (Şekil 5).



Şekil 5. Güneş gözesi işletme gözesi sıcaklığının giriş su sıcaklığı ve ΔT ile değişimi*

* Bu ilişkiler ısı değişiminin PVT boyunca yaklaşık doğrusal olduğu kabulü iledir.

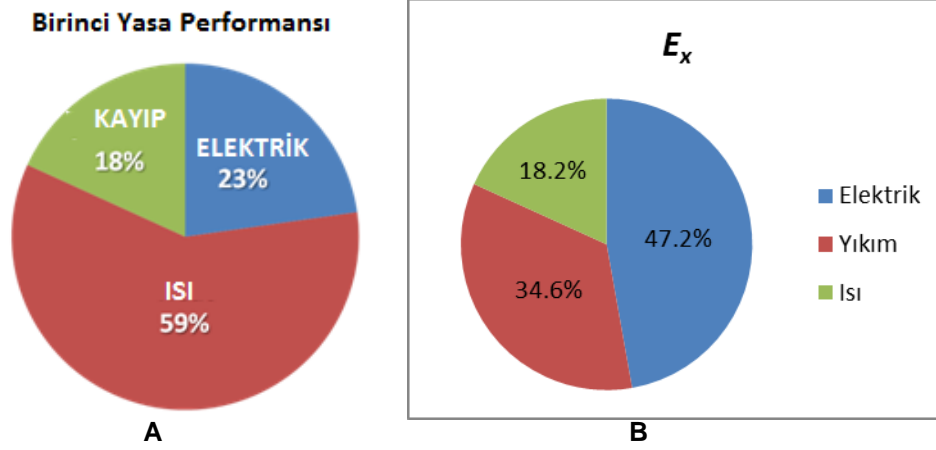
Görüldüğü üzere, etkin bir güneş gözelerinin soğutması için $T_{giriş}$ sıcaklığının özellikle yaz aylarında 40°C in üzerine çıkması tercih edilmemelidir. Aynı zamanda pompa debisi mümkün ve ekonomik olduğunca yüksek olması gerekir. Enerji tasarrufu açısından da pompa debisi denetlenmelidir. Mamafih, en önemli avantaj iki birimin ışınım yüzey alanını paylaşmalarıdır. Diğer bir deyişle aynı m^2 yüzey alanını birlikte güç ve ısı üretirken (Eş konumlu ve eşzamanlı) kullanılmaktadırlar. Böylece örneğin bir binanın çatısında elektrik gücünün ve ısıl gücün ayrı birimlerde üretildiği toplam ışınım alanının sadece yarısı kullanılmaktadır. Bu nedenle de zaten çok fazla olmayan çatı alanlarında daha etkin kullanılabilmekte, kapasite artmaktadır. PVT sistemi BIG temel tarifinin yapıldığı AB 2004/8/EC Yönergesine tam uyum sağlamaktadır. PVT (Photo-voltaic thermal) sistemi yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışan birlikte ısı ve güç sistemine en basit fakat en çarpıcı bir örneğidir. Bu örnek bize yenilenebilir enerji kaynaklarını melez biçimde (güneş ve rüzgâr gibi) kullanabileceğimiz gibi sistem veya cihaz tabanında da melezleşmeye gitmemiz gerektiğini vurgulamaktadır. Şekil 6 da görülen PVT biriminin arkasındaki ısı değiştiricide (ID) güneş gözelerinin ısıyı kapalı bir devrede suya (sıcak su) bazı durumlarda ise açık veya kapalı devrede havaya (sıcak hava) aktarılır. Elde edilen yararlı ısı konfor ısıtmasında, sıcak su eldesinde ve benzeri diğer uygulamalarda kullanılır. Bu yöntem Güneş gözelerinin aşırı ısınmasını ve verim kaybını önler.



Şekil 6. Güç ve ısıyı birlikte üreten (birleşik) güneş enerjisi sistemi, PVT.

PVT de gene ekserjin önemi ön plana çıkmaktadır. Şekil 7-A da piyasada bir PVT nin Birinci Yasa performansı örneklenmiştir. Bu görsele göre güneş enerjisinden % 23 oranında elektrik (etkin soğutulduğu için verim yüksek) ve % 59 oranında ise sıcak su üretilmektedir. Enerji kaybı sadece % 18 dir. Enerji nitelikleri doğrudan toplanabildiğinden toplam verim de % 82 olmaktadır. Bu görsel bize hangi ışınım değerinde bu sonuçların elde edildiği, üretilen sıcak suyun sıcaklığına ilişkin

soruları yanıtızsız bırakmaktadır. Hâlbuki, bu performans değerleri güneş ışınımına bağlıdır. Ayrıca suyun sıcaklığı yani niteliği de önemlidir. Su sıcaklık talebi eğer düşükse düzlemsel toplaç verimi artar. Buna karşın elektrik verimi de biraz yükselir çünkü PVT de dolaşan su daha soğuktur. Aksine su sıcaklık talebi artarsa toplaç verimi azalır, PVT de dolaşan su güneş gözesini çok soğutamayacağından elektrik verimi de biraz düşer. Dolayısı ile bir PVT performansı tek başına ölçülemez, talep sıcaklığı, çevre sıcaklığı, rüzgâr hızı ve yönü, nem, ışınım miktarı gibi parametrelerle performans oranları sürekli değişir. Dolayısı ile tek bir katalog performans değerleri geçerli olamaz hatta yanıltıcı olurlar. Bu sorun çözülsün bile PVT nin nitelik yönünden performansına Birinci Yasa cevap verememektedir. Bunun örneği aşağıda verilmiş ve ekserji performansı Şekil 7-B de gösterilmiştir.



Şekil 7. Bir tipik PVT modülün Birinci ve İkinci Yasa Performansları (Verili koşullarda)

PVT nin sıcak suyu 60°C (333 K) da ürettiği ve güneş ışınımının da (I) 700 W/m² olduğu varsayılmıştır. Işınım yüzey alanı 1 m² dir. PVT ye güneşin sağladığı birim ekserji, ε_s aşağıdaki denklemden bulunur

$$\frac{I}{S_c} = \frac{700}{1366} = \frac{\epsilon_s}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{5778}\right)} = \frac{1 - \frac{T_{ref}}{T_s}}{\left(1 - \frac{T_{ref}}{5778}\right)} \quad (8)$$

Bu birim ekserjiyi Carnot çevrimi tabanında temsil eden sanal güneş enerjisi sıcaklığı 552 K dir. Çevre denge sıcaklığı, T_{ref} de 283K alınmıştır. Dk. 8 den:

$$\epsilon_s = 0.487 \text{ W/W}, T_s = 551.6 \text{ K},$$

$$E_{XS} = I \cdot A \cdot \epsilon_s = Q_s \cdot \epsilon_s = 700 \text{ W/m}^2 \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 0.487 \text{ W/W} = 340.9 \text{ W}$$

$$E_{XE} = \eta_{IE} \cdot \epsilon_E \cdot Q_s = 0.23 \cdot 1 \cdot 700 = 161 \text{ W}, \text{ bu } E_{XS} \text{ in } \% 47.2 \text{ sidir.}$$

$$E_{XH} = \eta_{IH} \cdot \epsilon_H \cdot Q_s = 0.59 \cdot (1 - 283/333) \cdot 700 = 62 \text{ W}, \text{ bu değer } E_{XS} \text{ in } \% 18.2 \text{ dir.}$$

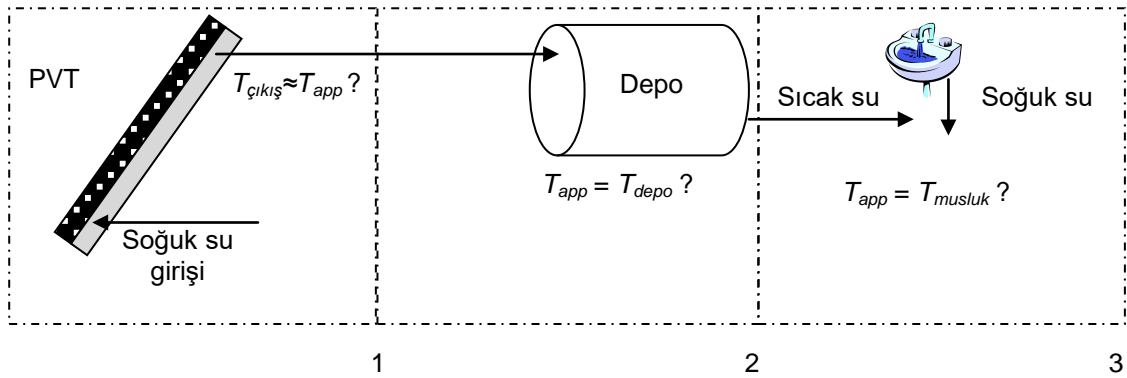
$$E_{Xdes} = 340.9 \text{ W} - 161 \text{ W} - 62 \text{ W} = 117.9 \text{ W} = \% 34.6\%.$$

İkinci Yasa açısından birim ekserjiler üst üste toplanamaz ama bir süreçteki toplam ekserji değerleri E_x (ε·Q) toplanabilir. Akılcı Ekserji Yönetim Modeline (REMM) göre de hesaplanan akılcı ekserji verimi, ψ_R için toplama işlemi geçerli değildir. Bunun nedeni Carnot teriminin lineer olmayışıdır (Şekil 9). Bu işlem için güneş gözelerinin yüzey sıcaklığı T_E nin de bilinmesi gerekir. Bunun da ötesinde ekserji akılcılığı açılarından üretilen suyun nerede ve hangi sıcaklıkta kullanıldığı da önemlidir (Şekil 8).

Bu örneğe bakıldığında İkinci Yasa performansının Birinci Yasaya göre oldukça farklı, olduğu sonuçların güneş ışınımına bağlı olduğu, üretilen su sıcaklığına bağlı olduğu ve çevresel koşullara

daha duyarlı ve anlamlı olduğu görülmektedir. Örneğin Şekil 7-A ya göre enerji kaybı sadece % 18 iken aynı koşullarda, aynı PVT Şekil 7-B ye göre % 34.6 oranında ekserji yıkımına neden olmaktadır. Birinci Yasaya göre PVT üretiminde ısı baskın, İkinci Yasaya göre elektrik daha baskındır.

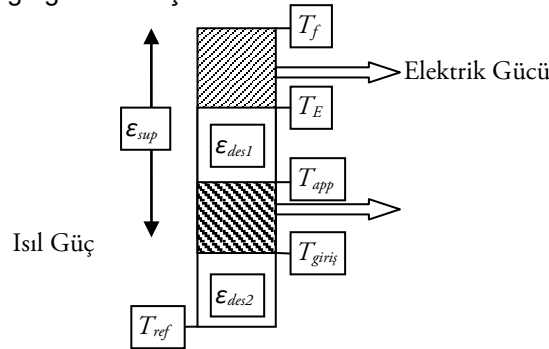
Talep tarafının etkisi ise Şekil 8 de incelenmiştir. Burada T_{app} , uygulama (talep: application) sıcaklığı olup değişik noktalarda tanımlanmış olabilir. Bu ise ekserji çözümlemesinde farklılıklar oluşturur. Bu nedenle T_{app} in gerçekçi bir noktada tutarlı bir biçimde tanımlanması gerekir. Bu bağlamda en iyi çözüm T_{app} sıcaklığını tanımlayan uygulamanın açıkça belirtilmesidir. Eğer son talep noktasındaki sıcaklık ile ısı değiştirici çıkışındaki sıcaklık arasında pek fark yoksa T_{app} olarak ısı değiştirici çıkışındaki sıcaklık ($T_{çıkış}$) ölçülüp hesaplarda kullanılabilir. Ancak PVT ye bağlı bir sıcak su boylerinin sıcaklığı veya son kullanım noktasındaki muslukta soğuk su ile karıştırılıp daha düşük bir sıcaklık talep edildiği koşulda ise aradaki ekserji yıkımlarının da göz önünde tutulması amacı ile en son talep noktası T_{app} olarak kabul edilir. Her kapsama alanı için T_{app} değişmektedir ve ekserji akışı çubuğu (Şekil 9) da buna göre değişmektedir. T_{app} kapsama alanındaki uygulama (Talep) nedir sorusunun cevabı ile yanıtlanmaktadır:

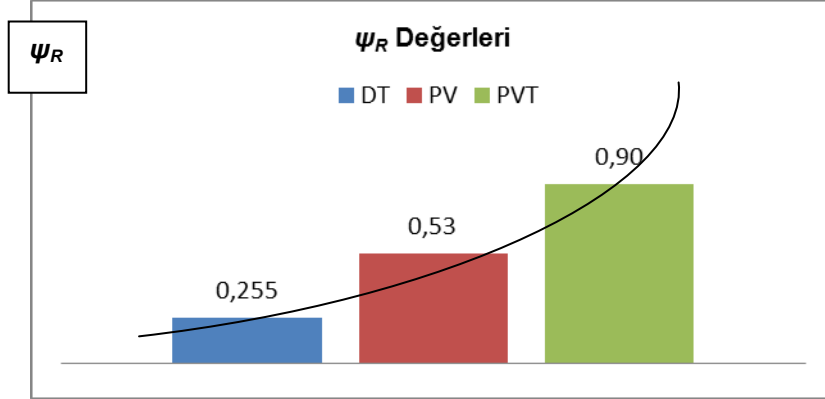


Şekil 8. Bir PVT uygulamasında T_{app} sıcaklığının talep noktası nerededir sorusu ile değişimi [3]

- 1- Talep hemen PVT sıcak su çıkışındadır. Bu ısı güç hemen aynı sıcaklıkta yararlı iş(ler)de kullanılmaktadır (örneğin 80°C),
- 2- Talep hemen boyler çıkışındadır (örneğin 65°C),
- 3- Talep lavaboda ılıştırılmış su şeklindedir (örneğin 40°C).

T_{app} ne olursa olsun, PVT uygulamasında güneş gözeli sistemde yıkılan ekserjinin bir bölümü daha yıkılmadan önce ikinci bir cihazda değerlendirilerek yıkılan ekserji (Şekil 9, beyaz alan) daraltılmaktadır. Böylelikle Akılcı Ekserji Yönetim verimi daha da yükselmiştir (Şekil 10). Şekil 9 da görüldüğü üzere yenilenebilir enerji sistemleri melezleştikçe yani birleşik ısı ve güç sistemlerine dönüştükçe potansiyel katma değerleri artmaktadır. Çizelge 1 ise DT, PV ve PVT cihazlara ilişkin, aynı güneş ışınımına maruz koşuldaki verim karşılaştırmaların vermektedir. Bu çizelgeden görüldüğü üzere PVT, birinci ve ikinci yasa verimlerin ile akılcı ekserji yönetimi verimi açılarından en yüksek değerlere sahiptir. Diğer yandan Çizelge 1 ekserjiye dayalı çözümlemenin cihaz tercihlerindeki önemini göstermektedir. Örneğin sadece birinci yasa verimi göz önünde tutulsa idi DT ve PV arasındaki verimlilik sıralaması DT sonra PV şeklinde olacaktı ve PV sisteminin daha akılcı ve tercih edilebilir olduğu gözden kaçacaktı.



Şekil 9. PVT birimi için ekserji akış çubuğu ($T_{giriş} > T_{ref}$).**Şekil 10.** DT, PV ve PVT birimleri için Akılcı Ekserji Yönetimi verimleri.**Tablo 1.** DT, PV ve PVT birimlerinin karşılaştırması.

Sistem	Birinci Yasa Verimi, η_I	İkinci Yasa Verimi, η_{II}	Akılcı Ekserji Yönetim Verimi, ψ_R	CO ₂ salım azaltımın a katkısı
DT	0,65	0,175	0,269	1
PV	0,20	0,36	0,53	1,62
PVT	(0,22+0,70)	0,58	0,90	7,31

REMM TABANLI MODEL

Şekil 11 de gösterilen modele de uygulanabilir tarzda bir çözümlenme algoritması geliştirilmiştir. Bu modelde net sıfır-ekserjili bir binaya enerji bir rüzgâr türbininden, PVT dizisinden ve toprak kaynaklı ısı pompasından sağlanmaktadır.

A- Rüzgâr Türbini

Rüzgâr türbininin akılcı ekserji verimi türbinin hidromekanik birinci yasa verimine eşittir ve Betz yasası ile sınırlıdır.

$$\psi_R = \eta_{WT} \quad (9)$$

Carnot çevrimi eşdeğeri sanal T_f değeri de Denklem 10'dan hesaplanır.

$$T_f = \frac{T_{ref}}{1 - \psi_R} \quad (10)$$

B- PVT Dizisi

Akılcı Ekserji verimi Şekil 9 dan hesaplanır. Ancak su dolaşımının performansa etkisi ve kullanılan pompanın talep ettiği güç önemlidir. Bu konuda aydınlatıcı bir ön bilgi aşağıda verilmiştir. Güneş gözesi veriminin sıcaklıkla değişimi:

$$\eta_{PV} = c(a - bT'_m) \quad , \quad (11-a)$$

veya



$$\eta_{PV} = \eta_0(1 - d[T_m' - T_0]) \quad (11-b)$$

Burada,

η_0 = Güneş gözesinin standart deney koşullarındaki verimi,

a, b, c, d = korelasyon sabitleri,

T_m' = Güneş gözesinin uygulamada ölçülen sıcaklığı

T_0 = Güneş gözesinin standart deney sıcaklığı

PVT nin uygulama taleplerine göre değişik amaçları olabilir. Örneğin amaç toplam ekserjinin ençok olması ise:

$$OF = c \left(a - bT_m' \right) \times 0,96 + \eta_{FP} \left(1 - \frac{283}{T_m} \right) \quad \{\text{Pompa talebinin ihmal edildiği durum}\} \quad (12)$$

$$T_m' = T_m + I(1 - \eta_{PV})\eta_{FP}R \quad (13)$$

T_m ortalama su sıcaklığı,

R ise Güneş gözesi ile arkasında boru içerisinde dolanan su arasındaki toplam ısıl dirençtir.

Optimum su sıcaklığı değeri yaklaşık olarak:

$$T_{mopt} = 17,176 \sqrt{\frac{\eta_{FP}}{bc}} \quad (14)$$

Bu koşuldaki debi de hesaplanabilir

$$\Delta T = 2(T_{mopt} - T_{in}) \quad (15)$$

$$\dot{m} = \frac{I(1 - \eta_{PV})\eta_{FP}}{C_p \Delta T} \quad (16)$$

C- Isı Pompası

$$\psi_R = COP \times (1 - T_{ref}/T_a) \quad \{\text{elektrik gücünün birim ekserjisi 1 alınmıştır}\} \quad (17)$$

UYGULAMA

Senaryo 1.

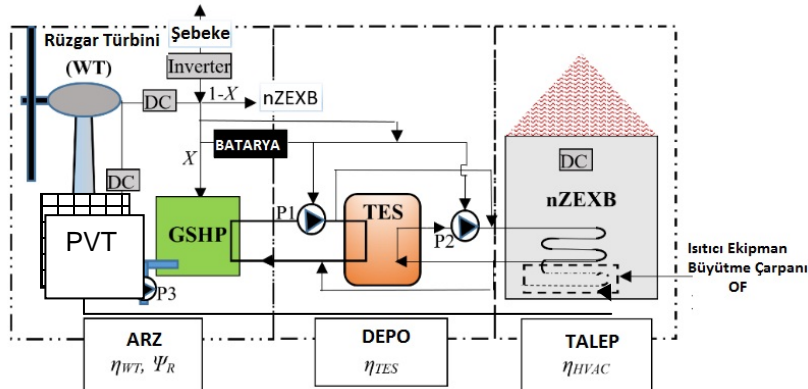
Rüzgâr türbini, PVT ve GSHP karması bir yenilenebilir enerji sistemi Şekil 11 de gösterilmiştir.

Türbin tasarım koşullarında 10 kW elektrik üretmekte, bunun yarısını GSHP nin tahrikine vermektedir.

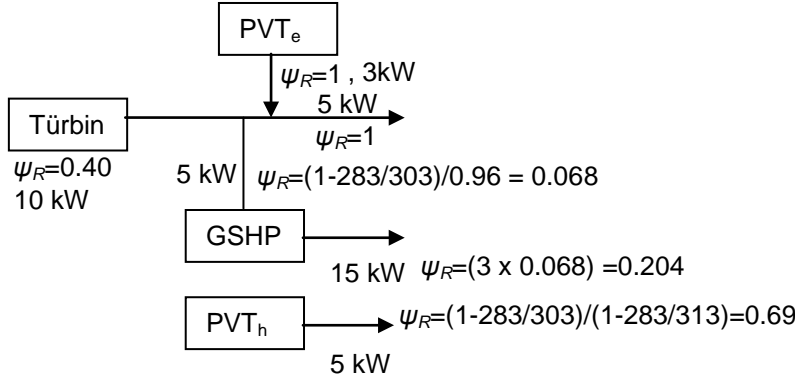
Diğer yarısı evde elektrikli aletlerde kullanılmaktadır. PVT sistemi ise 3 kW elektrik (doğrudan eve) ve

5 kW ısıyı da 313 K de üretmekte ve bu ısıyı GSHP ile birlikte doğrudan döşemeden ısıtma sistemine

vermektedir.



Şekil 11. REMM Çözümlemesinde nZEXB, GSHP, Rüzgâr Türbini ve bina tümleşği [4,5,6] Şekil 12 de tasarım koşullarında bu karma sürdürülebilir sistemin toplam Akılcı Ekserji Verim hesabında gerekli olan parametre değerleri gösterilmiştir. Isı pompasının COP değeri 3 alınmıştır.



Şekil 12. Model çözüm için enerji ve ekserji akışları

Şekil 12 deki değerlere göre ortalama asistem akılcı ekserji verimi:

$$\bar{\psi}_R = \frac{0.40 \times 10 \times 1 + 3 \times 1 \times 1 + 5 \times 1 \times 1 + 5 \times 1 \times 0.068 + 15 \times 0.204 \times (1 - 283 / 313) + 5 \times 0.69 \times (1 - 283 / 313)}{10 \times 1 + 3 \times 1 + 5 \times 1 + 5 \times 0.068 + 15 \times (1 - 283 / 313) + 5 \times (1 - 283 / 313)}$$
$$= 0.64$$

Bu değer tasarım koşullarında rüzgar ve güneş enerjisi yanısıra toprak ısısının kullanımı ile yukarıdaki yük paylaşımında bir binanın elektrik ve ısıtma taleplerinde kullanılmasının ekserji akılcılığının yüzde 69 olduğunu göstermektedir.

Senaryo 2.

Bu senaryodaki tek fark ısı pompasının olmayışıdır. Bu durumda Gerekli 10 kW ısı ek DT sisteminden karşılanmaktadır. Bu senaryoya ilişkin akılcı ekserji verimi aşağıdaki şekilde bulunmuştur:

$$\psi_R = \frac{0.40 \times 10 \times 1 + 3 \times 1 \times 1 + 5 \times 1 \times 0.068 + 10 \times 0.255 \times (1 - 283 / 313)}{10 \times 1 + 3 \times 1 + 5 \times 1 + 10 \times (1 - 283 / 313)} = 0.40$$

Görüldüğü üzere, toprak kaynaklı ısı pompasının kullanımı her ne kadar rüzgar ve PVT den elde edilen gücün bir kısmını kullanmakta ise de binanın talep ettiği ısının karşılanmasında düzlemsel toplama oranla daha akılcı olmaktadır. Ayrıca 5 kW güç de yaralı biçimde başka bir işte kullanılabilir veya şebekeye verilebilir.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu makalede verilen örnekler, rüzgar ve güneş enerjisinin ısı pompası ile veya ısı pompasız olarak bir sürdürülebilir binanın taleplerini karşılamada kullanılmasının mukayeselerinde ve değerlendirilmelerinde, bu bağlamda uygun çözümlerin bulunmasında Birinci Yasa kadar İkinci Yasanın da önemli olduğuna işaret etmektedir. Örneğin, yukarıda verilen örnekte ısı pompası çıkarılsa ve örneğin elektrikle ısıtma yapılırsa bu seçeneğe ekonomiklik dışında Birinci Yasanın diyeceği birşey

yoktur. Halbuki değeri Senaryo 2 ye benzer biçimde tekrar hesaplanırsa bu değerin azalacağı ortadadır. Buna karşın COP değeri 3 den daha yüksek olsa bu değer artacaktır. Böylelikle gerçek anlamda enuygun sistem bileşenlerinin özellikleri ve yük paylaşımları birçok seçenek denenerek görülebilecektir. Dolayısı ile bu algoritma ile en uygun sistem tasarımını yeni bir anlayışla gerçekleştirilebilecektir. Ne yazık ki PVT konusunda geniş bir literatür ve uygulama sonuçları bulunsa da bu yayınların hemen hepsi birinci Yasa ile sınırlıdır. Bununla birlikte, sınırlı sayıdaki ekserji çözümleri de içeren çalışmalarda sadece PVT modülü ele alınmakta PVT modülün diğer sistemlerle tümleşmesinin ortaya koyduğu mühendislik problemlerine değinmemektedirler [7-9]. Hatta dolaşım pompasının ekserji yıkımı ve güç talebi dahi göz ardı edilmektedir [10].

KAYNAKÇA

- [1] Kılış, B. 2014. Enerji Binaçomuzda enerji mi ekserji mi daha öncelikli? Standard Dergisi, Sayı 624, Kasım 2014, s: 18-21, TSE: Ankara.
- [2] Kılış, Ş. 2011. A rational exergy management model to curb CO₂ emissions in the exergy-aware built environments of the future, PhD Thesis, Bulletin/Meddelande No. 204, ISBN 978-91-7501-129-5, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [3] Kılış, B. and Kılış, Ş. 2015. Yenilenebilir enerji kaynakları ile birleşik ısı ve güç üretimi TTMD, **32**, ISBN978-975-6263-25-9, Doğa Basımevi, İstanbul.
- [4] Kilkis, B. Rationalization and optimization of heating systems coupled to ground-source heat pumps. ASHRAE Transactions 2000; **106-2**:817-822.
- [5] Kilkis, B. An analytical optimization tool for hydronic heating and cooling with low-enthalpy Energy resources ASHRAE Transactions 2012; **108-2**: 988-996.
- [6] Kilkis, B., Kilkis, Şiir, Kilkis, Şan, Optimum hybridization of wind turbines, heat pumps, and thermal energy storage systems for nearly zero-exergy buildings (NZEXB) using rational exergy management model, 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, 15-18 Mayıs, Rotterdam (Makale kabul edildi).
- [7] Adarsh, K P., Pradeep, C P., Origanti, S S., Arun, K., and Sudhir, K T. 2015. Energy and exergy performance evaluation of a typical solar photovoltaic module, Thermal Science, Vol. 19, suppl. 2: s625-s636.
- [8] Jiang F., Toh P G., Goh L H, Leung K O, and Kelvin L. 2016. Design and thermal performance test of a solar photovoltaic/thermal (PV/T) collector, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 6, November.
- [9] James A., Zahir D., Sinisa S., and Lascelle M. 2015. Performance testing of thermal and photovoltaic thermal solar collectors, Energy Science & Engineering, Wiley O.L.
- [10] DualSun. 2016. DualSun Wave, A revolutionary hybrid solar technology, data sheet, <<https://dualsun.fr/en/product/2-in-1-solar/>>, last visited on 23.10.2016.

ÖZGEÇMİŞLER

BİROL KILKIŞ

Dr. Kılış, 1949 yılında Ankara da doğdu. 1970 yılında ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümünden yüksek şeref derecesi ile mezun oldu. Aynı bölümden M. Sc ve Doktora derecelerini alarak von Karman Enstitüsünden Akışkanlar Mekaniği dalında şeref derecesi ile mezun oldu. 1981 yılında TÜBİTAK Teşvik Ödülünü Kazandı. ASHRAE Yüksek Performans Binaları Komitesi üyesi ve ASHRAE TC 7.4 Sürdürülebilir Binalar İçin Ekserji Analizi Teknik Komitesi Kurucu Başkanıdır. Diğer beş teknik komitenin de üyesidir TTMD nin de kurucu üyelerindedir. Halen Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Profesör kadrosunda hizmet vermektedir. Ayrıca Enerji Mühendisliği Yüksek Lisans Programı Ana Bilim Dalı Başkanı olup Avrupa Birliği Isıl Güneş Enerjisi Platformu Yönetim Kurulu Üyesidir.

Şiir KILKIŞ

Dr. Şiir KILKIŞ doktora derecesini 2011 yılında KTH Kraliyet Teknoloji Enstitüsü Mimarlık ve Yapılı Çevre Fakültesi'nden İnşaat ve Mimarlık Mühendislik alanında almıştır. Magna cum laude ile mezun olduğu Georgetown Üniversitesi'nden lisans derecesine ve "Bilim, Teknoloji ve Uluslararası İlişkiler Altın Madalya" ödüllüne sahiptir. Doktora tezinde "Akılcı Ekserji Yönetim Modeli (REMM) geliştirilerek, geleceğin yapılı çevresinde CO2 salımlarının azaltılmasına yönelik yön gösterilmiştir. Araştırma alanları bütünleşik enerji sistemleri ve net-sıfır hedefleri, sürdürülebilir yerleşkeler ve kentler ve karşılaştırmalı analizlere odaklanmıştır. Disiplinlerarası araştırmaları sonucunda otuzdan fazla şehri içeren sürdürülebilir kalkınma endeksi geliştirilmiş, uluslararası havaalanları sınıflandırılmış, çevre dostu yerleşkeler analiz edilmiş ve İsveç'teki Uppsala ilindeki Östra Sala backe projesi için yenilikçi net-sıfır ekserji kent kavramı geliştirilmiştir. Dr. KILKIŞ Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nda (TÜBİTAK) Bilimsel Programlar Uzmanı olarak görev yapmaktadır. Bu kapsamda, Ulusal Bilim, Teknoloji ve Yenilik Stratejisi'nin geliştirilmesine katkı sağlamış ve Enerji Verimliliği Teknoloji Yol Haritası çalışmasını koordine etmiştir. Dr. KILKIŞ'ın SCI makalelerinin yanı sıra "Enerji Mühendisliği ve Teknoloji Ansiklopedisi'nde yazardır. Başkent Üniversitesi Enerji Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda "Enerji Ekonomisi" ve "Enerji Politikaları," ayrıca Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yer Sistem Bilimleri Yüksek Lisans Programı'nda "Sürdürülebilir Kalkınma" derslerini vermektedir. Uluslararası toplantılarda Bilimsel Danışman Kurulu üyesidir.