

FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLERİN VE FOTOVOLTAİK-TERMAL (PV-T) KOLEKTÖRLERİN TERMODİNAMİK DEĞERLENDİRMESİ

Murat ÖZTÜRK**

Yrd. Doç. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi,
Doğu Yerleşkesi, Hidrojen Teknolojileri
Araştırma ve Uygulama Merkezi,
Çünür, Isparta
muratozturk@sdu.edu.tr

Nuri ÖZEK

Prof. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi,
Isparta
nuriozek@sdu.edu.tr

Hece BATUR

Süleyman Demirel Üniversitesi,
Isparta
hece.batur@gmail.com

Murat KOÇ

Süleyman Demirel Üniversitesi,
Isparta
muratkoc32@gmail.com

ÖZET

Fotovoltaik (PV) sistem üzerine düşen güneş radyasyonunun yaklaşık yüzde 75'inden fazlasını yansıttığı için veya termal enerjiye dönüştürdüğü için elektrik enerjisine dönüştüremez. Bu durum PV hücrenin çalışma sıcaklığını yükseltir ve aynı zamanda elektrik enerjisi dönüşüm verimini azaltır. Güneş radyasyonunun PV/T kolektör ile termal ve elektrik enerjisine birleşik dönüşümü sağlanabilir. PV/T sistemin imalatı, etkin fotovoltaik soğutma etkisi sağlayacak şekilde boşluk bırakılarak düzlemsel termal kolektör üzerine PV panelin yerleştirilmesiyle yapılmaktadır. Bu çalışmada, termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa bağlı olarak PV sistemin ve PV/T kolektörün sırasıyla enerji ve ekserji verimlilikleri ve aynı zamanda incelemesi yapılan bu güneş enerjisi dönüşüm sistemlerinin iyileştirme potansiyeli ve sürdürülebilirlik indeksi gibi yeni termodinamik parametreler sunulmuştur. Modelin geçerliliğini ortaya koymak için, Isparta'nın tipik meteorolojik şartlarıyla ilişkili olarak bazı sayısal hesaplamalar yapılarak bu sistemlerin performansı değerlendirilmiştir. Sistem veya ürünün yaşam döngüsü süresince çevresel kritik aşamaları belirlemek ve ölçmek için ve/veya sistemin veya ürünün toplam çevresel etkilerindeki azalmak ve değerlendirmek için analitik yardımcı araç olarak yaşam döngüsü değerlendirme (Life Cycle Assessment, LCA) analizi araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Güneş enerjisi dönüşüm sistemlerinin LCA analizi sonuçlarına göre, PV/T kolektör düşük sıcaklıklı termal enerjiyi yararlı enerji olarak kullandığı için çevresel etkisi PV sisteminkinden daha düşük olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: PV sistem, PV-T kolektör, ekserji verimliliği, LCA analizi

Thermodynamic Assessment of Photovoltaic (PV) Systems and Photovoltaic-Thermal (PV-T) Collectors

ABSTRACT

More than 75% of the solar radiation falling on photovoltaic (PV) system is not converted into electricity, but either reflected or converted into thermal energy. This leads to an increase in the PV cell's working temperature and consequently, a drop of electricity conversion efficiency. Hybrid conversion of solar radiation implies simultaneous solar radiation conversion into thermal and electrical energy in the photovoltaic/thermal (PV/T) collector. A PV/T system consist a PV panel placed on a flat plate thermal collector, with a gap between them to achieve an effective photovoltaic cooling. In this study, energy and exergy efficiency of PV system and PV/T collector according to First and Second Laws of Thermodynamics, respectively, and also new thermodynamic parameter such as improving potential and sustainability index of these solar energy conversions have been derived. In order to appreciate the model, numerical calculations have been made for evaluating these systems performance corresponding to typical climate of Isparta, Turkey. The investigation uses life cycle assessment (LCA), which is an analytical tool to identify and quantify environmentally critical phases during the life cycle of a system or a product and/or to evaluate and decrease the overall environmental impact of the system or product. The LCA results for the solar energy conversion systems indicate that the PV/T collector has lower environmental impacts than the PV system because it uses low temperature thermal energy.

Keywords : PV system, PV-T collector, efficiency, exergy efficiency, LCA analysis.

** İletişim Yazarı

* Geliş tarihi : 07.07.2011
Kabul tarihi : 23.08.2011

GİRİŞ

Yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanılması fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve çevresel kaygılar nedeniyle son zamanlarda artmıştır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin üretim miktarlarının artırılmasının yanında, kurulum maliyetleri daha yüksek olduğu için, bu sistemlerin daha verimli kullanımı önemli bir sorun haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak için işletim mekanizmalarının bilinmesi, sistemlerin yapısının ve öneminin insanlara anlatılması, mümkün olduğu kadar kişi başına düşen doğal kaynak tüketimini azaltacak sistemlik tasarımların geliştirilmesi ve çevresel zararların önlenmesi için atıkların nasıl bertaraf edilmesinin gerekli olduğu bilincinin geliştirilmesi, gelecek kuşaklara yaşanabilir bir çevre bırakmak için uluslararası boyutta son derece önem taşımaktadır [1]. PV ve PV-T sistemler çevreye zararsız bir şekilde düşük işletim bakım maliyetleriyle hemen hemen kalıcı bir şekilde enerji üretim seçeneklerini sağlayabilir. PV ve PV-T sistemlerin ekserji analizini daha gerçekçi bir planlamayla sunmak için iyileşme performansının değerlendirilmesi ve geliştirilmesi aşamalarında kullanılmalıdır. Birleşik fotovoltaik/termal (veya basitçe PV/T) kolektörler güneş enerjisini eş zamanlı olarak elektrik ve ısı enerjisine dönüştüren sistemlerdir [2]. PV/T kolektör, PV modülü ve arkasına yerleştirilmiş olan emici plakadan oluşmaktadır. Emici plakanın iki ana görevi bulunmaktadır. Birincisi, fotovoltaik (PV) modülü soğutmak ve böylece elektrik üretim performansını arttırmak, ikincisi ise PV sistem tarafından çevreye atılan atık ısıyı yararlı işe çevirmektir. PV/T kolektör tarafından toplanan ısı konutun sıcak su ihtiyacının karşılanması gibi düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir.

PV/T sistemlerin farklı teorik ve deneysel çalışmaları literatürde bulunmaktadır. Kern ve Russell [3] ısı değiştiricisi olarak suyun kullanıldığı PV/T sistemlerin ana konseptleri ile birlikte deneysel sonuçları vermişlerdir. Raghura [4], sıvılı tip PV/T düzlemsel kolektörlerin performansının belirlenmesi için bazı sayısal metotları sunmuştur. Lalovic [5] birleşik PV/T kolektörler için düşük maliyetli imalat için a-Si hücreleri önermiştir. Zondag vd. [6] tarafından bildirildiği üzere PV/T kolektörlerin elektrik ve termal performansları ayrı ayrı PV panellerden ve ticari düzlemsel termal kolektörlerden daha düşüktür. Fakat iki adet PV/T kolektör birbirine yakın olan bir PV paneli ve bir termal kolektörden birim alan başına daha fazla enerji üretmektedir. Bu durum özellikle yüzey alanının çok önemli olduğu uygulamalarda önem taşımakta ve PV/T kolektörünün önemi ortaya çıkmaktadır. Zondag vd. [7], birleşik PV/T kolektörlerin analizi için model geliştirmişler ve sistemin değişik boyutları için yaptıkları deneysel çalışmaları sunmuşlardır. Chow [8] tarafından, düzlemsel kolektör ile

boruları temas halinde bulunan tek camlı PV/T kolektörün 0,01 kg/s akış hızında %60 termal verime sahip olduğu ve PV sistemin elektrik veriminin de %2 oranında arttığını bildirilmiştir. PV modül ve düzlemsel kolektör arasında uygun termal kontak sağlanmış camsız birleşik PV/T kolektör üzerine başka bir deneysel çalışmada, Zakharchenko vd. [9] tarafından sunulmuştur. Daha yüksek toplam kolektör verimliliğine ulaşılması için PV/T sistemdeki modül ve kolektörün alanın eşit olmasına gerek olmadığını bildirmişlerdir. Fotovoltaik termal (PV/T) güneşli su ısıtıcı birleşik sistemlerinin termal modellemesi de literatürde bulunmaktadır [10-11]. Chow vd. [12], camlı ve camsız PV/T kolektörlerin deneysel sonuçlarını literatüre sunmuşlardır. Ayrıca, PV/T kolektör üzerine koruyucu camın kullanılmasının hem termal ve hem de toplam enerji çıktısını yükseltmek için uygun olduğunu bildirmişlerdir. Agrawal ve Tiwari [13], binaya entegre edilmiş PV/T sistemi optimize etmişler kolektörleri seri bağlamanın daha iyi bir performans sağladığını bildirmişlerdir. Fujisawa ve Tani [14], ekserji analizine bağlı olarak PV/T kolektörün analizini yapmışlar ve PV/T kolektörün bir birim PV modülden veya sıvılı düzlemsel kolektörden daha yüksek çıktı verimine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, araştırmacılara ve yenilenebilir enerji teknolojisi alanında yatırım yapan girişimcilere yol göstermesi amacıyla PV sistemlerin ve PV/T kolektörlerin enerji ve ekserji analizleri yapılmış, incelemesi yapılan güneş enerjisi teknolojilerinin ekserji verimliliklerine bağlı olarak sürdürülebilirlik indeksleri ve iyileştirme potansiyelleri sürdürülebilirlik yaklaşımı çerçevesinde belirlenmiş ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Yapılan bu çalışmada aynı zamanda, yaşam döngüsü değerlendirme analizi kullanılarak güneş enerjisi dönüşüm sistemleri olan PV sistemin ve PV/T kolektörün çevresel etkileri gösterilmiştir. Güneş enerjisi dönüşüm sistemleri temiz enerji üretim teknolojileri olmalarına rağmen, bu sistemlerin üretimi ve kurulumu süresince oluşan olumsuz etkiler göz ardı edilmemelidir ve bu yüzden PV sistem ve PV/T kolektör için yaşam döngüsü değerlendirme analizi incelenmiştir.

ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Enerji Analizi

Enerji; bir cisim ya da sistemin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır. Enerji; fiziksel bir sistemin ne kadar iş ya da ısı alışverişini yapabileceğini belirleyen bir durum fonksiyonudur. Enerji korunumludur. Yani evrende var olan enerji yok olmaz, sadece biçim değiştirebilir. Termodinamiğin birinci kanunu, enerjinin termodinamik bir kavram olarak korunumunu ve dönüşümünü ifade etmektedir. Bir sistem için enerji dengesi aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$e_{\text{depol}} = e_{\text{girdi}} - e_{\text{çıkı}} \quad (1)$$

Burada $e_{\text{depolanan}}$ sistemde depolanan enerjiyi, e_{girdi} ve $e_{\text{çikti}}$ sırasıyla sisteme giren ve sistemden çıkanların enerjilerini göstermektedir. Sistemden çıkanların enerjisi ise;

$$e_{\text{çikti}} = e_u + e_k \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada e_u ürünlerin enerjisini ve ek enerji kaybını göstermektedir.

Ekserji Analizi

Termodinamik problemlerin çözümü için Termodinamiğin I. kanunu yeterli olmadığından, ekserji ya da entropi kavramlarını içeren II. kanunun da, I. kanun ile birlikte sistemin veya prosesin analizinde kullanılması gerekmektedir. Bazı bilim adamları tarafından ekserji kavramı, aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

- Bir enerji şeklinin ya da maddenin ekserjisi, onun çevre üzerinde değişim yapabilme potansiyeli, kalitesi ya da kullanılabilirliğinin bir ölçüsüdür [15].
- Ekserji, herhangi bir maddenin, çevresiyle tersinir anlamda termodinamik denge haline gelmesi esnasında elde edilebilecek maksimum iştir [16].
- Belirli bir haldeki sistemin yapabileceği en çok iştir [17].
- Ekserji, sistemin çevresiyle etkileşimi sonucu, ısı transferinin sadece çevreyle olması durumunda elde edilebilecek maksimum teorik yararlı iştir [18].
- Ekserji, tersinmez sistemler veya süreçlerde, entropi üretiminin neden olduğu kullanılabilir enerji kaybını belirleyen bir ifadedir [19].
- Bir termodinamik sistemin ekserjisi, sistemin sadece çevresiyle etkileşimi durumunda, sistemin çevresiyle tümüyle termodinamik denge haline gelirken, elde edilebilecek maksimum teorik yararlı iş (mekanik veya elektrik işi) olarak tanımlanır [20].

Rosen ve Dincer'e göre ise "Enerji, çevre ve sürdürülebilir gelişmenin bir karışımı olarak karşımıza çıkar. Enerji, hareket veya hareket üretme yeteneğidir. Ekserji ise, iş ya da iş üretebilme kabiliyetidir" şeklinde tanımlanır [21]. Ekserji, aynı zamanda teknik iş yapma kapasitesi olarak da tanımlanabilir. Ekserji sadece faydalı enerji düşüncesinden oluşmayan, aynı zamanda çevreyi kirleten enerji kaynaklarının tüketiminin azaltılması ve yeni çevre dostu enerji kaynaklarının kullanıma sunulması gibi konuları da kapsayan çok önemli bir mühendislik yaklaşımıdır [17]. Dinçer tarafından ekserji ve enerji kavramları, Tablo 1'de ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır [15].

Termodinamik Parametreler

Mühendislik sistemleri için verimlilik ifadesi genel olarak çıktının girdiye oranı olarak tanımlanabilir. Bu tanımlama verimliliğin anlaşılmasında basit ve genel bir tanımlama olmasına rağmen, farklı mühendislik sistemleri ve işletimleri için özel verimlilik ilişkileri üretilmiştir [22]. Enerji (η) ve ekserji (ψ) verimlilikleri, bulunduğu kabul edilen kararlı-hal sistemleri için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\eta = \frac{\text{çıktı ürünlerindeki enerji}}{\text{proses girdilerindeki enerji}} = \frac{E_{\text{girdi}}}{E_{\text{çikti}}} \quad (4)$$

$$\psi = \frac{\text{çıktı ürünlerindeki ekserji}}{\text{proses girdilerindeki ekserji}} = \frac{\dot{E}x_{\text{çikti}}}{\dot{E}x_{\text{girdi}}} \quad (5)$$

Ekserji verimliliği genellikle sistemin işletilmesinde ideal veya teoriksel üst limite ne ölçüde yaklaşabildiğinin bir ölçüsüdür. Bu tanımlama enerji verimlilikleri için doğru değildir [23]. Sürdürülebilir gelişme stratejileri yalnızca temiz ve pahalı olmayan enerji kaynaklarının kullanımını

Tablo 1. Enerji ve Ekserji Kavramlarının Karşılaştırılması [15]

Enerji	Ekserji
Çevresel değişkenlere değil, sadece madde veya enerji akış değişkenlerine bağlıdır.	Madde ve enerji akımının her ikisine de bağlıdır.
Sıfırdan farklı değere sahiptir. (Einstein'ın $E=mc^2$ bağıntısına göre).	Sıfıra sahip değeri vardır (Çevre ile dengede olduğu ölü durumda sıfırdır).
Tüm proseslerde Termodinamiğin I. kanunu ile ifade edilir.	Sadece tersinir prosesler için Termodinamiğin I. kanunuyla gösterilir. Tersinmez proseslerde kısmen veya tamamen yok olur.
Hareket veya hareketi üretme kabiliyetidir.	İş ya da iş üretme kabiliyetidir.
Bir proseste her zaman korunur. Yoktan var ya da vardan yok olmaz.	Tersinir proseslerde her zaman korunur. Tersinmez proseslerde ise her zaman tüketilir.
Niceliğin (miktarın) bir ölçüsüdür.	Niceliğin ve entropi nedeniyle niteliğin (kalitenin) bir ölçüsüdür.

gerektirmez. Aynı zamanda bu enerji kaynaklarının verimliliği kullanılmalarının gerekliliğini bildirir. Sürdürülebilirlik indeksi (SI) ve ekserji verimliliği arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilebilir [24].

$$SI = 1 - \psi^{-1} \quad (6)$$

Bu ifade sürdürülebilirlik yaklaşımının, prosesin veya sistemin ekserji değişiminden nasıl etkilendiğini göstermektedir. Enerji dönüşüm prosesleri için iyileştirme potansiyeli ($I\dot{P}$) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [25].

$$I\dot{P} = (1 - \psi) \left(\dot{E}x_{girdi} - \dot{E}x_{çikti} \right) \quad (7)$$

Proses veya sistem için ekserji verimliliklerindeki maksimum iyileştirme potansiyeli ekserji kaybı veya tersinmezlik ($\dot{E}x_{girdi} - \dot{E}x_{çikti}$) minimize edildiğinde ulaşılabilir.

GÜNEŞ ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN TERMODİNAMİK DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde, PV sistemlerin ve PV-T güneş kolektörlerinin Termodinamiğin I. ve II. Yasalarına bağlı olarak sırasıyla enerji ve ekserji analizleri verilmiştir.

Fotovoltaik Sistem

PV hücreler yarıiletken materyallerden yapılan, çeşitli boyutlarda üretilen, güneşten aldığı ışığı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılan sistemlerdir. PV sistemlerden üretilen elektrik enerjisi yenilenebilir enerji kaynağı olarak umut verici ve artan enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilir büyüklükte potansiyele sahiptir [26].

Fotovoltaik Sistemin Enerji Dengesi

PV sistemin enerji dengesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$En_{PV} = En_{PV, elektrik} + En_{PV, termal} \quad (8)$$

burada $En_{PV, elektrik}$ PV sisteminden elektrik üretimini $En_{PV, termal}$ ve PV sisteminden olan ısı kayıplarını göstermektedir. PV sistem tarafından üretilen elektrik enerjisi aşağıdaki gibi verilir.

$$En_{PV, elektrik} = V_{oc} I_{sc} \quad (9)$$

Sırasıyla V_{oc} açık devre voltajını ve I_{sc} kısa devre akımını göstermektedir. PV sistemden çevreye olan ısı kayıpları aşağıdaki gibi verilir.

$$En_{PV, termal} = h_{ca} A_c (T_c - T_a) \quad (10)$$

Burada T_c hücre sıcaklığı (K) ve h_{ca} PV hücreden çevreye olan konvektif ve ışımsal ısı kaybıdır (W/m^2K). Kararlı hâlde güneş hücre sıcaklığı aşağıdaki gibi verilir.

$$4T_c^5 - 3T_a T_c^4 - T_a T_s^4 = 0 \quad (11)$$

PV hücreden çevreye olan konvektif ısı kaybı, rüzgar hızına bağlı olarak aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$h_{ca} = 2,8 + (3,0xv_r) \quad \text{için } 0 \leq v_r \leq 7 \text{ ms}^{-1} \quad (12)$$

Burada v_r PV sistemin hemen üzerinde ölçülen rüzgar hızıdır. Sonuç olarak PV sistemin toplam enerji dengesi aşağıdaki gibi verilir.

$$En_{PV} = V_{oc} I_{sc} + h_{ca} A_c (T_c - T_a) \quad (13)$$

Fotovoltaik Sistemin Enerji Verimliliği

PV sistemin enerji verimliliği sistemin çıktı enerjisinin (elektrik ve termal enerji), PV yüzey üzerine ulaşan girdi enerjisine (güneş enerjisine) oranı olarak tanımlanabilir ve aşağıdaki gibi verilir.

$$\eta_{PV} = \frac{En_{PV}}{I_s x A_c} = \frac{V_{oc} I_{sc} + h_{ca} A_c (T_c - T_a)}{I_s x A_c} \quad (14)$$

Güneş PV hücreleri için, verimlilik ifadesi ışımsal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme kapasitesini ölçer. Elektrik çıkış gücü PV cihazın çıkış voltajının ve akımının bir ürünüdür ve akım-gerilim eğrisi olarak alınır (I-V eğrisi) [29]. PV sistemin toplam günlük elektrik verimi aşağıdaki gibi verilir.

$$\eta_{PV,D} = \frac{E_{PV,E}}{E_s} \quad (15)$$

Burada $E_{PV,E}$ (Wh) PV sistem tarafından gün boyunca üretilen toplam elektrik enerjisini göstermektedir.

Fotovoltaik Sistemin Ekserji Dengesi

PV sistem tarafından üretilen elektrik ekserjisi, mevcut enerjinin tamamını faydalı olarak kullanmayı amaçlar. PV sisteme bağlı ekserji üretimi ise üç bileşenden oluşmaktadır; i-) elektrik kazancı, ii-) dışsal ve iii-) içsel kayıplardır. PV sistem için yukarıda bahsedilen bileşenler için ekserji dengesi aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV} = Ex_{PV, elektrik} - Ex_{PV, termal} - Ex_{PV-d, elektrik} \quad (16)$$

Burada $Ex_{PV, elektrik}$ PV sisteminin elektrik ekserjisini, $Ex_{PV,d, elektrik}$ ve $Ex_{PV,d-termal}$ sırasıyla içsel ve dışsal kayıplardan kaynaklanan ekserji yıkımını göstermektedir. İçsel kayıplar elektrik ekserjisi yıkımından ve dışsal kayıplar ise ısı

kaybından kaynaklanmaktadır. PV sistemin elektrik ekserjisi, elektrik enerjisine benzer şekilde aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV,elektrik} = V_{oc} I_{sc} \quad (17)$$

Elektrik ekserji kaybı aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV-d,elektrik} = V_{oc} I_{sc} - V_m I_m \quad (18)$$

PV sistemdeki termal ekserji, PV sistemin yüzeyinden çevreye olan ısı kaybından oluşmaktadır ve aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV,termal} = (1 - T_a / T_c) x [h_{ca} A_c (T_c - T_a)] \quad (19)$$

Denklem (17)-(19)'da elde edilen ifadeler Denklem (16)'da yerine konulursa, PV sistemin toplam ekserji değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Ex_{PV} = V_m I_m - (1 - T_a / T_c) x [h_{ca} A_c (T_c - T_a)] \quad (20)$$

Fotovoltaik Sistemin Ekserji Verimliliği

PV sistemin ekserji verimi, PV sistemin ekserji değerinin PV sistem yüzeyine gelen güneş radyasyonunun ekserji değerine oranı ile bulunur.

$$\Psi_{PV} = \frac{Ex_{PV}}{Ex_{güneş} x A_c} = \frac{V_m I_m - (1 - T_a / T_c) x [h_{ca} A_c (T_c - T_a)]}{[(1 - T_a / T_s) x I_s] x A_c} \quad (21)$$

burada $Ex_{güneş}$ güneş kolektörünün yüzeyine gelen güneş radyasyonunun ekserjisidir. Aşağıda verilen Denklemler (22)-(24) kullanılarak güneş radyasyonunun ekserjisini üç farklı yaklaşımla değerlendirilebilir. Jeter [30] tarafından türetilmiş Denklem (22) güneş radyasyonun ekserjisinin değerlendirilmesinde kullanılan en basitleştirilmiş olanıdır. Burada güneş radyasyonun ekserjisi güneş sıcaklığında akış sıcaklığı olarak kabul edilir. Diğer bir yaklaşım Denklem (23) ile Petela [31] tarafından geliştirilmiştir. Petela tarafından verilen güneş radyasyonu ekserjisi güneş sıcaklığında termal radyasyon olarak kabul edilir. Denklem (24)'de direk (I_{be}) ve difüz (I_{dif}) radyasyon bileşenleri ile güneş radyasyonunun ekserjisi verilmiştir [32].

$$Ex_{güneş} = \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) x I_s \quad (22)$$

$$Ex_{güneş} = \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s}\right)\right] x I_s \quad (23)$$

$$Ex_{güneş} = I_{be} x \left(1 - \frac{4T_a}{3T_s}\right) + I_{dif} \left(1 - \frac{4T_a}{3T_s^*}\right) \quad (24)$$

burada T_s güneş radyasyon sıcaklığıdır (5777 K) ve T_s^* aşağıdaki gibi verilir.

$$\frac{T_s}{T_s^*} = 0,9562 + 0,2777 \ln \left(\frac{1}{f}\right) + 0,0511 f \quad (25)$$

burada f difüz radyasyon yansıtma katsayısıdır [33].

Fotovoltaik-Termal Kolektör

Fotovoltaik ve foto-termal etkileşimden oluşan birleşik PV-T teknoloji, güneşten aldığı enerjiden hem elektrik hem de ısı enerjisi üretmektedir. PV-T kolektörlerin üstünlüğü, daha az yer kaplaması, PV ve ısı sistemlerin yan yana kullanılmasıyla karşılaştırıldığında, ortak kullanım sayesinde ekipman maliyetini azaltması olarak sıralanabilir.

Fotovoltaik/Termal Kolektörün Enerji Dengesi

PV-T kolektörlerin enerji dengesi aşağıdaki gibi verilir.

$$Q_{u,PV-T} = Q_T - Q_L \quad (26)$$

Denklem (26) eklenen ifadeler ile aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$Q_{u,PV-T} = A_c F_R \left[(\tau\alpha)_{eff} I_s - U_L (T_i - T_a) \right] \quad (27)$$

Burada F_R ısı kazanç faktörü, $(\tau\alpha)_{eff}$ etkin geçirgenlik soğurma katsayısı, U_L toplam kolektör ısı kayıp katsayısı (W/m^2K) ve T_i çalışma sıvısının kolektöre giriş sıcaklığıdır. Kolektör ısı kazanç faktörü aşağıdaki gibi verilir [34].

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (28)$$

Burada F' kolektör verim faktörü olup aşağıdaki gibi verilir [34].

$$F' = \frac{1 / U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D) F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D h_f} \right]} \quad (29)$$

Burada W ısı taşıyıcı akışkanın geçtiği boruların arasındaki boşluk (m), D borunun iç çapı (m), F standart kanat verimi, C_b sınır ve iletkenliği h_f boruların içindeki ısı transfer katsayısını göstermektedir.

Fotovoltaik/Termal Kolektörün Enerji Verimliliği

PV-T kolektörlerin enerji verimliliği aşağıdaki gibi verilir.

$$\eta_{PV-T} = \frac{\dot{Q}_{u,PV-T}}{I_s x A_c} = \frac{F_R \left[(\tau\alpha)_{eff} I_s - U_L (T_i - T_a) \right]}{I_s} \quad (30)$$

PV-T kolektörlerin ısı performansı, su giriş ve ortam sıcaklığına, kolektör üzerine gelen güneş ışınlarının yoğunluğuna ve yansıtıcıya bağlı olmaktadır. PV-T kolektörlerin günlük toplam verimliliği, elektrik ve ısı verimliliğine benzer olarak aşağıdaki gibi verilir [35].

$$\eta_{PV-T,D} = \frac{\eta_E}{\eta_{güç}} + \eta_{I,PV-T} \quad (31)$$

burada $\eta_{güç}$ işletimdeki bir santral için elektrik verimi olup değeri 0,38 olarak alınabilir [36].

Fotovoltaik/Termal Kolektörün Ekserji Dengesi

Kolektörde meydana gelen ısı kayıpları PV-T sistem için ısı kazancı olmaktadır. Dolayısıyla PV-T kolektörlerin ekserji dengesi aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV-T} = Ex_{PV-T,elektrik} + Ex_{PV-T,termal} - Ex_{PV-T,d-ekonomik} \quad (32)$$

PV sistemden farklı olarak, PV-T kolektörde bulunan PV sistem tarafından üretilen ısı ($Ex_{PV-T,termal}$) faydalı işe çevrildiği için burada kazanç olarak alınmıştır. ($Ex_{PV-T,d-ekonomik}$) içsel kayıplardan kaynaklanan elektrik ekserjisi yıkımını göstermektedir. PV sistemine benzer olarak PV-T sisteminin elektrik ekserjisi ve termal ekserjisi aşağıdaki gibi verilir.

$$Ex_{PV-T,elektrik} - Ex_{PV-T,d-ekonomik} = V_m I_m \quad (33)$$

$$Ex_{PV-T,termal} = \left(1 - \frac{T_i}{T_a} \right) Q_{u,PV-T} \quad (34)$$

buradan PV-T kolektörün ekserjisi için genel bir ifade olarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$Ex_{PV-T} = V_m I_m + \left(1 - \frac{T_i}{T_a} \right) Q_{u,PV-T} \quad (35)$$

Denklem (35)'den görüldüğü gibi, PV-T kolektörlerin ekserjisi elektrik ve termal ekserjilerin toplamıdır.

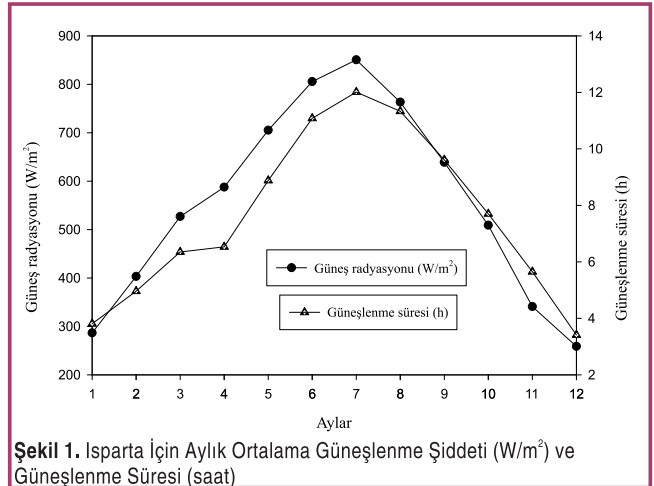
Fotovoltaik/Termal Kolektörün Ekserji Verimliliği

PV-T kolektörler hem elektrik enerjisini ve hem de atık ısıyı yararlı işe çevirdiği için ekserji verimliliği aşağıdaki gibi verilir.

$$\Psi_{PV-T} = \frac{Ex_{PV-T}}{Ex_{güneş}} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_i}{T_a} \right) Q_{u,PV-T}}{\left(1 - \frac{T_a}{T_s} \right) A_c I_s} \quad (36)$$

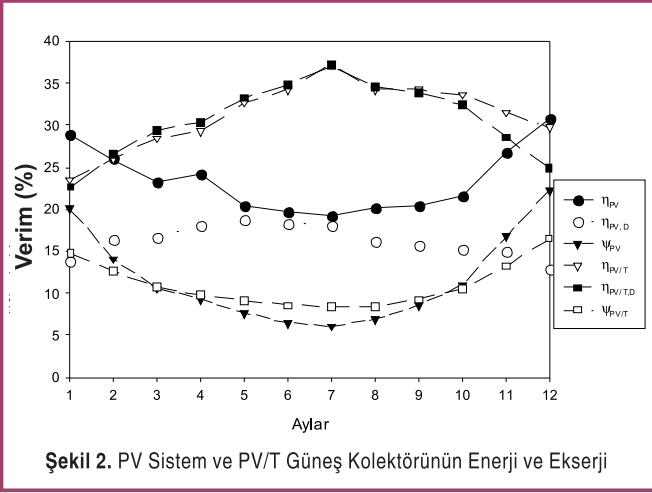
Örnek Uygulama 1

Bu çalışmada öne sürülen yaklaşım ilkelerini göstermek için, aşağıda belirtilen durum incelenmiştir. Isparta iklim verileri Türkiye meteoroloji istasyonundan alınan beş yıllık (2005-2009) verileridir. Bu verilere bağlı olarak Isparta için aylık ortalama güneş radyasyonu ve güneşlenme süresi Şekil 1'de verilmiştir. Kütle debisi (m) 0,001kg, düzlemsel kolektörün ısı kayıp katsayısı (U_L) $3,44 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, güneş radyasyonunu seyreltme faktörü (f) $1,3 \times 10^{-5}$, güneş radyasyonu sıcaklığı (T_i) 5777 K ve güneş hücresinin standart koşullarda referans verimliliği (η_0) 0,122 olarak alınmıştır. PV sistemin ve PV-T kolektörün boyutu $2,5 \times 1,6 \text{ m}$ (4 m^2) olarak alınmıştır.

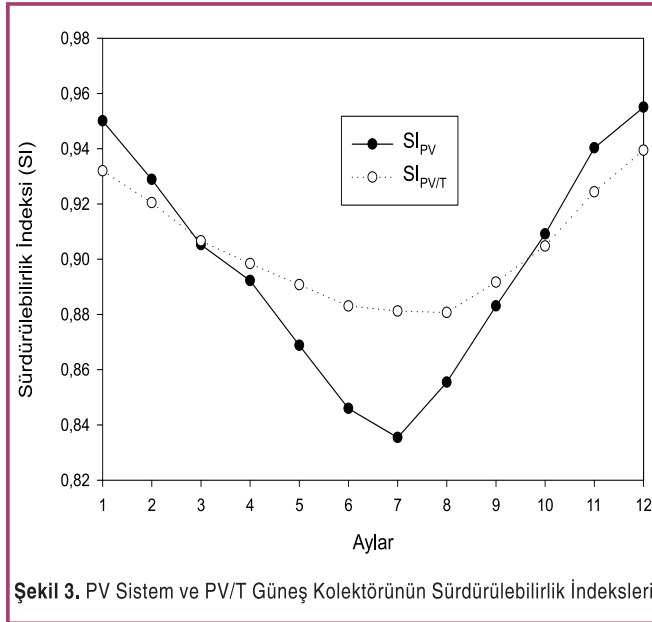


Şekil 1. Isparta için aylık ortalama güneşlenme şiddeti (W/m^2) ve güneşlenme süresi (saat)

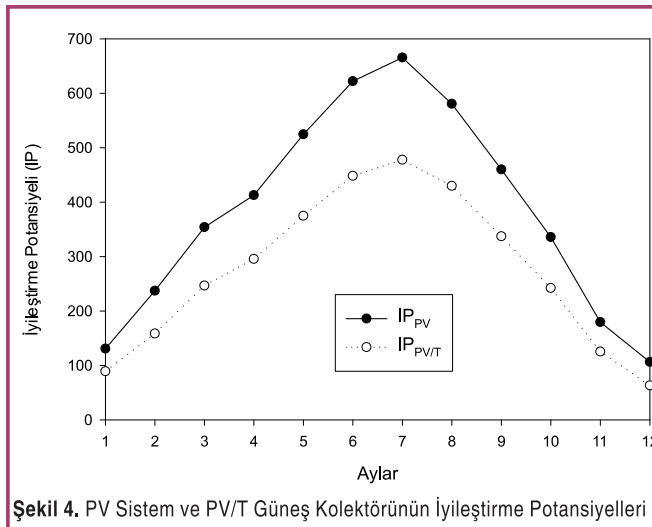
PV sistem ve PV-T kolektörün enerji ve ekserji verimlilikleri Şekil 2'de verilmiştir. Bu güneş enerjisi dönüşüm sistemleri için enerji verimlilikleri sırasıyla %19,26-30,69 ve %23,52-37,38 arasında değişmektedir. İncelemesi yapılan güneş enerjisi sistemlerinin toplam günlük enerji verimliliği ise sırasıyla %12,89-18,37 ve %22,66-37,19 arasında değişmektedir. Ekserji verimlilikleri ise tüm girişler, tersinmezlikler ve termal emisyonlar dahil edilerek hesaplandığında PV sistem ve PV/T kolektör için sırasıyla %6,07-22,23 ve %8,38-16,50 arasında değiştiği bulunmuştur. PV sistem için doldurma faktörüne bağlı güç dönüşüm verimliliği, enerji ve ekserji verimlilik değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 2'den görüldüğü gibi PV-T kolektörün toplam elektrik ve termal enerji çıktısında artış olduğu görülmektedir. Çünkü PV sistemin kolektör tarafından üretilen termal enerjiyi faydalı işe dönüştüremezken, PV-T kolektörü bu atık termal enerjiyi faydalı işe dönüştürmede kullanır. Güneş enerjisi dönüşüm sistemlerine elektrik üretim verimliliği açısından bakıldığında



Şekil 2. PV Sistem ve PV/T Güneş Kolektörünün Enerji ve Ekserji



Şekil 3. PV Sistem ve PV/T Güneş Kolektörünün Sürdürülebilirlik İndeksleri



Şekil 4. PV Sistem ve PV/T Güneş Kolektörünün İyileştirme Potansiyelleri

ise PV-T kolektöründen üretilen elektrik enerjisi, PV modülünden daha düşük sıcaklıkta çalıştığı için PV sisteminden daha düşüktür. PV-T kolektörün ekserji analizi sonuçlarına göre, düşük sıcaklıktaki termal uygulamalar ve PV sistemin elektrik verimliliğini arttırmak için kullanılmalıdır. PV-T kolektörlerinin elektrik ve termal performansı ayrı ayrı PV panellerinin ve düzlemsel kolektörün performanslarından düşüktür. Ancak iki adet PV-T kolektörü bir PV ve bir düzlemsel kolektörün birim alanda ürettiği enerjiden daha fazla enerjiyi üretmektedir. Ayrıca, PV sistemi ve PV/T kolektörünün sürdürülebilirlik indeksi (SI) Denklem (6) kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir. PV sistem ve PV-T kolektör için SI değeri sırasıyla 0,83-0,96 ve 0,87-0,94 arasında değiştiği hesaplanmıştır.

PV sistemin ve PV-T kolektörün SI değeri sırasıyla yedinci ve sekizinci aya kadar azalmakta ve on ikinci aya kadar artmaktadır. Sistemin ekserji verimliliği, sisteme giren ve sistemden çıkan ekserjiden faydalanarak PV sistemin ve PV-T kolektörün iyileştirme potansiyeli Denklem (7) kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir.

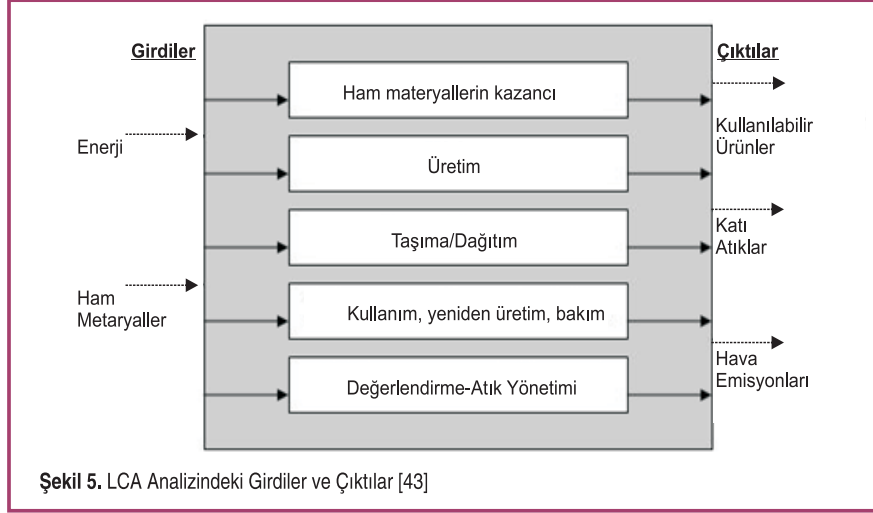
PV sistemin ve PV-T kolektörün iyileştirme potansiyelleri yedinci aya en yüksek değere sahiptir. Şekil 1 göz önüne alındığında, bu sonuçların direkt güneş radyasyonuna ve Isparta güneşlenme süresine bağlı olduğu bulunmuştur. Şekil 3 ve 4'te görüldüğü üzere, ortam sıcaklığı artarken, PV sistemde SI değeri ve ekserji verimliliği azalmaktadır. Bundan dolayı PV sistemin iyileştirme potansiyeli artmaktadır. PV sistemlerin genel verimliliğini arttırmak için bu kolektörlerin soğutulması gereklidir. Bu sorun için en sürdürülebilir çözüm PV-T kolektörler gibi atık ısının faydalı alanlarda kullanılmasıdır.

YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME ANALİZİ

Yaşam döngüsü değerlendirme (Life Cycle Assessment, LCA) analizi ürünün veya prosesin ömrü boyunca kullanımını içeren, sistemin tümüyle ilişkili olan emisyonların çevresel etkisini değerlendirmede kullanılır [37]. Ürün-temelli LCA inceleme altındaki ürünün (mesela ham maddenin çıkarılması ve işlenmesi, procesten geçirilmesi, kullanımı, ürünlerin yeniden kullanımı ve yeniden üretimi, atık düzenlenmesi) değer zincirini kapsayan tüm prosesleri içermektedir. Proses-temelli LCA, çalışma altındaki prosesin planlaması, yapımı, işletimi ve hizmetten çıkarılmasını kapsar [38]. Ürün temelli LCA'lar, proses temelli LCA'dan daha yaygın olarak kullanılmaktadır [37-39]. LCA politika yapmada proses seçiminde, tasarım ve optimizasyonda [40-41] önemli rol oynamaktadır. Çeşitli enerji üretim seçeneklerinin kara, su ve havaya olan atıkların etkisinin doğru kıyaslanması için LCA analizinin yapılması gereklidir. Bu ayrıntılı analiz ile yakıtın, üretim ve taşıma etkilerini, gücün kullanımı ve atıkların bertaraf edilmesi incelenebilir. Genel olarak, LCA çalışmalarında bu yan etkiler maliyete çevrilmeye

çalışılmaz. Çünkü insan sağlığının ve çevresel etkilerin parasal olarak karşılığı yoktur. Bunun yerine, LCA tam olarak yaşam döngüsü zemininde enerji seçimlerinin çevresel etkilerini araştırmayı temel alır.

Envanter analizi prosesi kayıtlama ve ayırma adımlarını içerir [42]. Kayıtlama, bilgilerin ve verilerin toplanması, sistem sınırlarının incelenmesi ve verilerin onaylanmasından oluşur. Ayırma; bazı kurallara bağlı olarak girdilerin ve yan-



Şekil 5. LCA Analizindeki Girdiler ve Çıktılar [43]

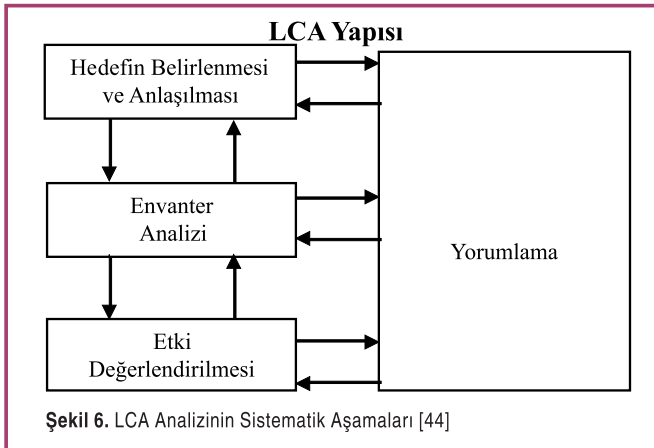
Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizinin Tanımı

Yaşam döngüsü terimi, incelemesi yapılan ürünün ya da prosesin ömrü boyunca olan en önemli etkinlikleri tanımlar. Şekil 5'te LCA analizinde kullanılan beş yaşam döngüsü, hesaplanan girdiler ve çıktılarla birlikte gösterilmiştir [42]. LCA analizi ürünü, sistemi ve prosesi değerlendirmek için kullanılan "beşikten mezara" yaklaşımıdır. Bu yaklaşımın sınırları doğadan hammaddenin elde edilmesiyle başlar ve doğaya geri döndüğü noktada sonlanır [43].

Metodolojik Yapı

LCA Şekil 6'da gösterildiği gibi, i-) hedefin belirlenmesi ve anlaşılması, ii-) envanter analizi, iii-) etki değerlendirilmesi ve iv-) yorumlama aşamalarından oluşmaktadır [44].

Tablo 2'de gösterildiği gibi; amacın belirlenmesi ve anlaşılması prosesi analizinin amacının belirlenmesi, sistem sınırının kurulması ve verilerin değerlendirilmesini kapsar.



Şekil 6. LCA Analizinin Sistemik Aşamaları [44]

Tablo 2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin Genel Metodolojisi

Amaçlar	Adımlar	Tanımlamalar
Hedefin belirlenmesi ve anlaşılması	Hedefin belirlenmesi	Analiz hedeflerinin belirlenmesi
	Anlaşılması	Sistemin sınırlarının ve fonksiyonel birimlerinin kurulması
Envanter analizi	Kayıtlama	Bilgilerin ve verilerin toplanması, sistem sınırlarının incelenmesi, verilerin onaylanması
	Ayırma	Girdilerin ve yan ürünlerin, ana ürüne ve ortak ürüne ayrılması
Etki değerlendirilmesi	Sınıflandırma	Envanter girdi ve çıktı verilerini, potansiyel çevre etkilerine ayırma
	Karakterize etme	Farklı gerilme etkilerini bilinen yapı içine adapte etme
	Değerlendirme	Ağırlıklı faktörleri, farklı etki kategorilerine ayırma
Yorumlama	İnceleme	Ekolojik zayıflıkları ve potansiyel gelişmeleri tanıma
	İletişim kurma	İlerleme durumlarını analiz etme

ürünlerin (ana ürün ve sözde ürün olmak üzere) kesirlerinin tahsis edilmesini içerir. Etki değerlendirme prosesi sınıflandırma, karakterizasyon ve değerlendirme adımlarına sahiptir. Sınıflandırma çevresel etki potansiyeli olan giriş ve çıkış envanter verisinin çıkış ve giriş olarak ayrılmasından oluşur. Karakterizasyon bilinen yapı içindeki farklı gerginliklerin etki ilişkisinin birleşmesinden oluşur. Değerlendirme farklı etki kategorilerindeki ek ücret faktörlerinin tahsisini içerir. Yorumlama prosesi düşünülen prosesin ömür boyu değerlendirme sonuçlarını yorumlama ve iletişim kurmayı kapsar. Bu sonuçları çıkarmada kullanılan tahmin ve belirsizlikleri anlama ve tanımlama gereklidir.

Yaşam Döngüsü Değerlendirme Analizinin Faydaları

LCA analizi çevresel yönden çok önemlidir. Çünkü hammaddelerin üretiminden, en son atıkların salınımına kadar bütün işlemleri ve çevresel sonuçların incelenmesine yardımcı olur [42]. LCA çevresel etkilerde ortaya çıkan değişimleri sınıflandırma ve belgelendirme yeteneği sağlayarak karar verme organlarına alternatif işlemlerle ilgili çevresel atıkların sınıflandırılmasında yardımcı olur.

LCA analizini kullanarak aşağıda belirtilen analizler yapılabilir.

- Ürünle ilgili çevresel sonuçların sistematik değerlendirmeleri geliştirilebilir.
- Her bir yaşam döngüsü ve/veya büyük katılım işlemleriyle ilgili hava, su ve karaya atılan çevresel atıklar hesaplanabilir.
- Yaşam döngüsü basamakları ve çevresel ortam arasında bulunan etkileşimlerdeki önemli değişimlerin tanımlanmasına yardımcı olabilir.
- İki ya da daha fazla ürün/proses arasındaki sağlık ve çevresel etkiler kıyaslanabilir veya özel bir ürün ve prosesin etkileri tanımlanabilir.
- Bir ya da daha fazla alana olan çevresel etkiler tanımlanabilir.

Örnek Uygulama 2

Kullanılan Malzemeler

Malzemenin üretim süreci, ham malzemelerin bir ürün haline dönüşüne kadar ki her adımı kapsar. Ayrıca imalat işlemi sırasında meydana gelen taşıma da bu sürece dahildir. Yapım

Tablo 3. Güneş Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinde Kullanılan Malzemeler

PV sistem	PV sistem bileşeni	İkinci bileşen ve materyal	Miktar (kg)	PV sistem bileşeni	İkinci bileşen ve materyal	Miktar (kg)
	Çok kristalli silikon PV modülü		PV hücreler	2,8	Elektrik denge sistemi	Bakır
		Cıvalı kaplama	30	Plastik		0,50
		Geçirgen malzeme	5,2	Binanın çatı eğimi için destek	Galvanize demir çubuk	12
		Alüminyum iskelet	6		Alüminyum	4
		Çelik	1,60			
TOPLAM						62,9
PV/T kolektör	PV-T kolektör bileşeni	İkinci bileşen ve materyal	Miktar (kg)	PV-T kolektör bileşeni	İkinci bileşen ve materyal	Miktar (kg)
	Çok kristalli silikon PV modülü		PV hücreler	2,8	Reflektör	Alüminyum
		Cıvalı kaplama	30	Galvanize demir		12
		Geçirgen malzeme	5,2	Elektrik denge sistemi	Bakır	0,8
		Alüminyum iskelet	6		Plastik	0,5
		Çelik	1,6		Galvanize demir çubuklar	12
Isı geri dönüşüm ünitesi		Termal yalıtım maddesi	4	Mekanik denge sistemi		Alüminyum
		Kolektör çerçevesi	16		Bakır (ısı değiştirici)	8
		Kolektör geri kaplaması	4		Akışkan dolaşımı için boru	8
		Galvanize demir çubuklar	16			
TOPLAM						144

Tablo 4. Güneş Enerjisi Sistemlerinin Üretiminde Kullanılan Yaşam Döngüsü

PV sistem	Sistem bileşenleri	Temel enerji kullanımı (MJ _{prim})	Sistem bileşenleri	Temel enerji kullanımı (MJ _{prim})
	Güneş PV modülü	21320	Bakım	800
Destek	2800	Taşıma	1340	
Metal geri dönüşümü	2100	Diğer	550	
TOPLAM				28,9 GJ _{prim}
PV/T kolektör	Sistem bileşenleri	Temel enerji kullanımı (MJ _{prim})	Sistem bileşenleri	Temel enerji kullanımı (MJ _{prim})
	Güneş PV modülü	21320	Metal geri dönüşümü	2170
Kolektör	4800	Bakım	1326	
Su tankı	5100	Taşıma	1340	
Destek	3490	Diğer	890	
TOPLAM				40 GJ _{prim}

aşamasında, PV sistem ve PV-T kolektör için kullanılan malzemeler Tablo 3'te verilmiştir.

Enerji Kullanım Analizi

Yaşam döngüsü değerlendirme analizde yer alan enerji kullanım analizi kolaylık sağlamak amacıyla iki enerji tüketimine ayrılabilir: i-) doğrudan enerji tüketimi ve ii-) dolaylı enerji tüketimi. Doğrudan enerji tüketimi yaşam döngü adımları (üretim, taşıma, ayrıştırma) sırasında kullanılan doğrudan enerjidir. Dolaylı enerji tüketimi yaşam döngüsü adımları dışında kalan tüm enerji tüketimlerini kapsar [45]. Yaşam döngüsü süresince, PV sistem ve PV-T

kolektör için kullanılan toplam enerji miktarı Tablo 4'te verilmiştir.

Sera Gazı Emisyonları

Güneş enerjisi sistemlerinin üretiminde CO₂ emisyonları ortaya çıkar. Bu durumla ilgili emisyon faktörleri, malzeme girişleri ve tüm enerjinin çarpılmasıyla bulunur. Dolaylı CO₂ emisyonlarının dağılımı; PV sistem ve PV-T kolektör için Tablo 5'te verilmiştir. Bu güneş enerjisi sistemlerinin toplam CO₂ emisyon miktarları sırasıyla 851 ve 1159 kg olarak bulunmuştur.

Tablo 5. Güneş Enerjisi Sistemlerinin Karbondioksit Emisyonları

PV sistem	Sistem bileşenleri	CO ₂ (kg) emisyonu	Sistem bileşenleri	CO ₂ (kg) emisyonu
	Güneş PV modülü	520	Bakım	32
Destekleyici yapı	54	Taşıma	76	
Metal geri dönüşümü	55	Diğer	114	
TOPLAM				851
PV/T kolektör	Sistem bileşenleri	CO ₂ (kg) emisyonu	Sistem bileşenleri	CO ₂ (kg) emisyonu
	Güneş PV modülü	520	Metal geri dönüşümü	60
Kolektör	310	Bakım	55	
Su tankı	49	Taşıma	44	
Destekleyici yapı	36	Diğer	85	
TOPLAM				1159

Enerji Amortisman Süresi

Ekolojik ve çevresel olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının performansının değerlendirilmesinde amortisman süresi çok önemlidir. Enerjinin amortisman süresi aşağıdaki ifade ile verilebilir [46].

$$PBT_E = \frac{LCA_{enerji}}{E_{\text{ faydalı}} - E_{\text{ kullanılan}}} \quad (37)$$

burada LCA_{enerji} tüm yaşam döngüsü süresince tüketilen enerjiyi (GJ/yıl) ve $E_{\text{ kullanılan}}$ enerji kullanımı süresince yenilenebilir sistemin kullandığı enerjiyi (GJ/yıl) göstermektedir. Seçilen güneş kolektörünün enerji tasarrufu Isparta için ortalama sıcaklık ve güneş enerjisi girdisi göz önünde tutularak hesaplanır. Bu faydalı temel enerji tasarrufu ($E_{\text{ faydalı}}$), PV sistem ve PV-T kolektör için sırasıyla 1,44 ve 3,6 GJ/m²-yıl olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinin işletimi sırasında kullanılan enerji ihmal edilmiştir. Güneş enerjisi sistemlerinde enerjinin amortisman süreleri sırasıyla, 12 ve 3,8 yıldır. PV-T kolektör teknolojisi bu şartlar göz önüne alındığında elverişli ve faydalı olduğu görülmektedir.

CO₂ Amortisman Süresi

Yenilenebilir enerji sistemlerinin yaşam döngüsü boyunca, küresel etkileri ve emisyon tasarrufu karbondioksit amortisman süresiyle özetlenebilir. Yenilenebilir enerji sistemlerinden oluşan toplam emisyonlar enerji üretimine göre normalize edilmeli ve net elektrik üretimi GJ başına yayılan CO₂-eşdeğer-ton cinsinden bir emisyon oranıyla belirtilmelidir. CO₂ amortisman süresi ise aşağıdaki gibi verilebilir [46].

$$PBT_{CO_2} = \frac{CO_{2,eq-i}}{(CO_{2,eq-S}) - (CO_{2,eq-kullanılan})} \quad (38)$$

burada $CO_{2,eq-i}$ CO₂-eşdeğer-ton cinsinden küresel emisyonların genel kirlenici maddeyle ilgili üretim, montaj, taşıma, bakım ve güneş enerji sistemlerinin geri dönüşümü, $CO_{2,eq-S}$ CO₂-eşdeğer-ton cinsinden kirlenici maddenin yıllık emisyon tasarrufunu ve $CO_{2,eq-i}$ kullanılan CO₂-eşdeğer-ton cinsinden güneş enerjisi sistemlerini kullanımıyla ilgili kirlenici maddenin yıllık emisyonunu belirtmektedir. Konvansiyonel enerji üretim teknolojileri ile güneş enerjisi sistemlerinin beşikten mezara yaşam döngüsü boyunca CO₂ emisyonların karşılaştırılmasıyla sistemler ekolojiksel anlamda değerlendirilebilir. Bu çalışmada iki enerji üretim senaryosu kullanılmıştır. Birincisi, yardımcı sistem olarak global emisyon değeri 65,7 kgCO₂-eşdeğer/GJ olan konut şofben kazanı seçilmiştir [46]. İkincisi, şebeke hattından alınan ve global emisyon değeri 2009 yılında 161,8 kgCO₂-eşdeğer/GJ (bakınız Tablo 6) olan elektrik seçilmiştir. CO₂

amortisman süresi, PV sistem ve PV-T kolektör için sırasıyla, 3,6 ve 1,8 yıl olarak bulunmuştur.

Tablo 6. Türkiye Elektrik Şebekesinin Yaşam Döngüsü Emisyon Salınım Miktarları (kgCO₂-eşdeğer/GJ)

Teknoloji	Elektrik üretimi (% , 2009 Türkiye toplamı)	Yaşam döngüsü ihracat oranı (kg CO ₂ - eşdeğer/GJ)
Doğal gaz	% 46,1	155
Kömür	% 27,5	297
Su	% 22,2	4,32
Petrol	% 3,8	202,5
Rüzgar	% 0,2	3,51
Biyogaz	% 0,1	18,09
PV	% 0,003	15,66
TOPLAM (kg CO ₂ -eşdeğer/GJ)		161,79

SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, PV sistemlerin ve PV-T kolektörlerin daha iyi bir iyileştirme potansiyellerinin değerlendirilebilmesi için ekserji ve LCA analizinin kullanılmasının gerekliliği bildirilmiştir. Yenilenebilir enerji politikalarının amaçlarını karşılamak için yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak önemli bir sorun olarak karşımızda durmaktadır. Ayrıca, enerji kaynaklarının verimli ve yenilenebilir enerji teknolojisinin artan kullanımı çevresel kaygıları çözmemize yardımcı olacaktır. Artan yenilenebilir enerji kullanımı ve uygun enerji tüketiminin faydaları çevresel kirliliğin azalması yönündedir. Ayrıca ekonomik açıdan bakıldığında da yüksek enerji ve ekserji verimlilikleri, yatırım ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi için büyük bir potansiyeli sunar. Su tipli PV-T kolektörler su ısıtma için (özellikle evlere sıcak su) pratik cihazlar olabilir ve aynı anda elektrik enerjisi de üretebilirler; fakat ticari uygulamalar için henüz yerli teknoloji gelişmiş değildir. Bu nedenle yapılan bu çalışmada, PV-T kolektörlerinin standart PV sistemlere göre performans ve mali iyileştirme şartlarına bağlı değerlendirmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmalarla PV/T kolektörlerinin veriminin artırılması ve böylece maliyetin azaltılarak bu teknolojiyi daha rekabetçi hâle getirmek hedeflenmektedir. Özellikle günümüzde petrol fiyatları üzerindeki belirsizlik ortamı devam ederken ve çevre dostu yenilenebilir enerji teknolojisinin kullanımının artması ve global ölçekte kullanımının genişlemesi hedeflenmektedir. Bulunulan bölgeye göre PV/T kolektörlerinin farklı uygulamaları bulunmaktadır. Mesela soğuk bölgelerde, PV/T kolektörler binaya entegre edilerek PV sistemlerin havayla sıcaklığının düşürülmesi ve ortam ısıtması içinde bu sıcak havanın kullanıldığı uygulamalar bulunmaktadır. Türkiye'nin de içinde yer aldığı sıcak bölgelerde ise PV sistemlerin soğutulması, PV/T kolektör içinde su dolaştırılarak yapılmakta

ve konut uygulamaları içinde ısıtılmış suyun kullanıldığı uygulamalar bulunmaktadır. Türkiye gibi düzlemsel güneş kolektörlerinin yaygın olarak kullanıldığı; fakat PV sistemlerin henüz yaygın kullanımının bulunmadığı ülkelerde basit PV sistemleri yerine, birleşik PV/T kolektörlerin yaygın olarak kullanılabilecek potansiyel bir müşteri kitlenin bulunduğu gözden kaçırılmamalıdır.

SEMBOLLER

C_b	Sınır iletkenlik katsayısı
D	Boru iç çapı (m)
$e_{çıkıtı}$	Sistemden çıkan enerji (kJ)
$e_{depolanan}$	Sistemde depolanan enerji (kJ)
$E_{faydalı}$	Yıllık kullanılan faydalı enerji (GJ/yıl)
e_{girdi}	Sisteme giren enerji (kJ)
e_k	Enerji kaybı (kJ)
$E_{kullanılan}$	Yenilenebilir sistemin kullandığı enerji (GJ/yıl)
$En_{PV,elektrik}$	PV sistemin elektrik üretimi (kW)
$En_{PV,termal}$	PV sistemin ısı kaybı (kW)
$E_{PV,E}$	PV sistem tarafından gün boyunca üretilen toplam elektrik enerjisi (Wh)
e_u	Ürünlerin enerjisi (kJ)
$EX_{güneş}$	Güneş radyasyonunun ekserjisi (kJ)
$EX_{PV,d-elektrik}$	PV sistemin içsel kayıplardan kaynaklanan ekserji yıkımı (kJ)
$EX_{PV,elektrik}$	PV sistemin elektrik ekserjisi (kJ)
$EX_{PV,termal}$	PV sistemin dışsal kayıplardan kaynaklanan ekserji yıkımı (kJ)
F	Standart kanat verimi
F'	Kolektör verim faktörü
f	Difüz radyasyon yansıtma katsayısı
F_R	Isı kazanç faktörü
h_{ca}	PV hücre ısı kaybı (W/m^2K)
h_f	Boruların içindeki ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
I_{be}	Direk güneş radyasyonu (kW/m^2)
I_{dif}	Difüz güneş radyasyonu (kW/m^2)
IP	İyileştirme potansiyeli (kJ)
I_{sc}	Kısa devre akımı (A)
LCA_{enerji}	Yaşam döngüsü süresince tüketilen enerji (GJ)
SI	Sürdürülebilirlik indeksi
T_c	PV hücre sıcaklığı (K)
T_i	Çalışma sıvısının kolektöre giriş sıcaklığı (K)
T_s	Güneş radyasyon sıcaklığı (K)
U_L	Toplam kolektör ısı kayıp katsayısı (W/m^2K)
V_{oc}	Açık devre voltajı (V)
v_r	PV sistemin hemen üzerinde ölçülen rüzgar hızı (ms^{-1})
W	Isı taşıyıcı akışkanın geçtiği boruların arasındaki boşluk (m)

η	Enerji verimliliği
ψ	Ekserji verimliliği
$(\tau\alpha)_{eff}$	Etkin geçirgenlik soğurma katsayısı

Alt indisler

I	Termodinamiğin 1. Yasası
II	Termodinamiğin 2. Yasası
girdi	Giren ürünler
çıkıtı	Çıkan ürünler
u	Ürünler
k	Kayıp

KAYNAKÇA

1. **Öztürk, M.** 2009. "Hidrojen Üretim Metotlarının İncelenmesi," Doktora Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
2. **Ji, J., Lu, J.P., Chow, T.T., He, W., Pei, G.** 2007. "A Sensitivity Study of A Hybrid Photovoltaic/Thermal Water-Heating System With Natural Circulation." Applied Energy, vol. 84, p.222–237.
3. **Kern, E.C., Russell, M.C.** 1978. "Combined Photovoltaic and Thermal Hybrid Collector Systems." 13th IEEE Photovoltaic Specialists, Washington DC, USA, p.1153–1157.
4. **Raghuraman, P.** 1981. "Analytical Predictions of Liquid and Air Photovoltaic/Thermal Flat Plate Collector Performance." Journal of Solar Energy Engineering, vol. 103, p.291–298.
5. **Lalovic, B.** 1986. "A Hybrid Amorphous Silicon Photovoltaic and Thermal Solar Collector." Solar Cells, vol. 19, p.131–138.
6. **Zondag, H.A., de Vries, D.W., Van Steenhoven, A.A.** 1999. "Thermal and Electrical Yield of a Combi-Panel". Proceedings of ISES Bi-annual Conference on CD-ROM, Jerusalem.
7. **Zondag, H.A., de Vries, D.W., Van Helden, W.G.J., van Zolengen, R.J.C., Steenhoven, A.A.** 2002. "The Thermal and Electrical Yield of a PV/Thermal Collector." Solar Energy vol. 72, no 2, p. 113–128.
8. **Chow, T.T.** 2003. "Performance Analysis of Photovoltaic-Thermal Collector by Explicit Dynamic Model." Solar Energy, vol. 75, p. 143–152.
9. **Zakharchenko, R., Licea-Jiménez, L., Pérez-García, S.A., Vorobiev, P., Dehesa-Carrasco, U., Pérez-Robles, J.F.** 2004. "PV/thermal System." Solar Energy Materials Solar Cells, vol. 82, p. 253–261.
10. **Dubey, S., Tiwari, G.N.** 2008. "Thermal Modeling of a Combined System Of Photovoltaic Thermal (PV/T) Solar Water Heater." Solar Energy, vol. 82, p. 602–612.
11. **Tiwari, A., Dubey, S., Sandhu, G.S., Sodha, M.S., Anwar, S.I.** 2009. "Exergy analysis Of Integrated Photovoltaic Thermal Solar Water Heater Under Constant Flow Rate And Constant Collection Temperature Modes."

- Applied Energy, vol. 86, p. 2592–2597.
12. **Chow, T.T., Pie, G., Fong, K.F., Lin, Z., Chan, A.L.S., Ji, J.** 2009. “Energy and Exergy Analysis of Photovoltaic–Thermal Collector With And Without Glass Cover.” *Applied Energy* vol. 86, p. 310–316.
 13. **Agrawal, B., Tiwari, G.N.** 2010. “Optimizing the energy And Exergy Of Building Integrated Photovoltaic Thermal (BIPVT) Systems Under Cold Climatic Conditions.” *Applied Energy*, vol. 87, p. 417–426.
 14. **Fujisawa, T., Tani, T.** 1997. “Annual Exergy Evaluation On Photovoltaic–Thermal Hybrid Collector.” *Sol Energy Mater Sol Cells*, vol. 47, p.135–148.
 15. **Dincer, İ.** 2002. “The Role Of Exergy In Energy Policy Making, Energy Policy.” vol. 30, p. 137-149.
 16. **Szargut, J.** 2005. “Exergy Analysis: Technical and Ecological Applications.” Southampton (UK): WITPress.
 17. **Çengel, Y. A., Boles, M.A.** 2008. “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik.” İzmir Güven Kitap Evi, 5. Baskı, ISBN:9758431914.
 18. **Bejan, A.** 2006. *Advanced Engineering Thermodynamic*. 3rd edition, Wiley.
 19. **Hepbaşlı, A.** 2008. “Endüstriyel İşletmelerde Ekserji Yönetim Sisteminin Kurulması Gerekli mi?.” *Termodinamik Dergisi*, Haziran 2008, Sayı:190.
 20. **Tsatsaronis, G.** 2008. “International Journal of Exergy.” Vol. 5, Number 5-6, p. 489–499.
 21. **Rosen, M. A., Dincer, İ.** 1997. “On Exergy and Environmental Impact.” *International Journal of Energy Research*, vol. 21, p. 643-654.
 22. **Kanoglu, M., Dincer, I., Rosen, M.A.** 2007. “Understanding Energy and Exergy Efficiencies For Improved Energy Management in Power Plants.” *Energy Policy*. Vol. 35, p. 3967-3978.
 23. **Ptasinski, K.J., Prins, M.J., Pierik, A.** 2007. “Exergetic Evaluation of Biomass Gasification.” *Energy*. Vol. 32, p. 568-574.
 24. **Hepbaşlı, A.** 2008. “A Key Review on Exergetic Analysis and Assessment of Renewable Energy Resources for a Sustainable Future.” *Renewable and Sustainable Energy Revi.*, vol. 12, p. 593-611.
 25. **Midilli, A., Dincer, I.** 2009. “Development of Some Exergetic Parameters for PEM Fuel Cells For Measuring Environmental Impact And Sustainability.” *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol 34, p. 3858-3872.
 26. **Eltawil, M.A., Zhao, Z.** 2010. “Grid-connected Photovoltaic Power Systems Technical and Potential Problems-a Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 14, p. 112-119.
 27. **Lasnier, F., Ang, T.G.** 1990. “Photovoltaic Engineering Handbook.” Adam Higler; p. 258.
 28. **Kalogirou, S.A., Tripanagnostopoulos, Y.** 2006. “Hybrid PV/T Solar Systems For Domestic Hot Water And Electricity Production.” *Energy Conversion and Management*. Vol. 47, p. 3368–3382.
 29. **Zondag, H.A., Vries, D.W., Van Hendel, W.G.J., Van Zolingen, R.J.C., Van Streehoveer, A.A.** 2003. “The Yield of Different Combined PV-thermal Collector Designs.” *Solar Energy*, vol. 74, no 3, p. 253-269.
 30. **Jeter, S.M.** 1981. “Maximum Conversion Efficiency for the Utilization of Direct Solar Radiation,” *Solar Energy*, vol. 26, p. 231–236.
 31. **Petela, P.** 2003. “Exergy of Undiluted Thermal Radiation.” *Solar Energy*, vol. 74, p. 469-488.
 32. **Onyegebu, S.O., Morhenne, J.** 1993. “Transient Multidimensional Second Law Analysis of Solar Collectors Subjected to Time-varying Insulation With Diffuse Components.” *Solar Energy*, vol. 50, no 1, p. 85.
 33. **Landsberg, P.T., Tonge, G.** 1979. “Thermodynamics of the Conversion of Diluted Radiation,” *J. Phys A: Math Gen*, vol 12, p. 551.
 34. **Duffie, J.A., Beckman, W.A.** 2006. *Solar Engineering of Thermal Process*. ISBN 0-471-51056-4, A Wiley-Interscience Publication, New York.
 35. **Huang, B.J., Lin, T.H., Hung, W.C., Sun, F.S.** 2001. “Performance Evaluation of Solar Photovoltaic/Thermal Systems,” *Solar Energy*, vol 70, p. 443–448.
 36. **Kostic, L.T., Pavlovic, T.M., Pavlovic, Z.T.** 2010. “Optimal Design of Orientation of PV/T Collector With Reflectors,” *Applied Energy*, vol 87, p. 3023-3029.
 37. **Guinée, J.B., Udo de Haes, H.A., Huppés, G.** 1993. “Quantitative Life Cycle Assessment of Products 1: Goal Definition and Inventory,” *Journal of Cleaner Production*. Vol 1, no 1, p. 3-13.
 38. **Lombardi, L.** 2001. “Life Cycle Assessment (LCA) and Exergetic Life Cycle Assessment (ELCA) of a Semi-Closed Gas Turbine Cycle With CO₂ Chemical Absorption,” *Energy Conversion & Management*, vol 42, p. 101-114.
 39. **Guinée, J.B., Heijungs, R., Udo de Haes, H.A, Huppés, G.** 1993. “Quantitative Life Cycle Assessment of Products 2: Classification, Valuation and Improvement Analysis,” *Journal of Cleaner Production*, vol.1, no 2, p. 81-91
 40. **Azapagic, A.** 1999. “Life Cycle Assessment and Its Application to Process Selection, Design and Optimization”, *Chemical Engineering Journal*, vol 73, no 1, p. 1-21.
 41. **Burgess, A.A., Brennan, D.J.** 2001. “Application of Life Cycle Assessment to Chemical Processes,” *Chemical Engineering Science*, vol 56, no 8, p. 2589-2604.
 42. **Tupper, K.** 2002. “A Life Cycle Analysis of Hydrogen Production for Buildings and Vehicles,” *Master of Science, Dartmouth Collage*, 287 p.
 43. **Ciambrone, D.F.** 1997. “Environmental Life Cycle Analysis,” New York: CRC Press LLC.
 44. **LCAccess-LCA 101**, 2001. “U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation.”
 45. **Schaltegger, S.** 1996. “Life cycle assessment (LCA)– Quo Vadis?” *Birkhäuser Verlag*, Boston, 187 p.
 46. **Ardente, F., Beccali, G., Cellura, M., Lo Brano, V.** 2005. “Life cycle Assessment of a Solar Thermal Collector”. *Renewable Energy*, vol. 30, p. 1031-1054.