

Evsel Fotovoltaik Sistemlerin Ömür Boyu Maliyet Analizi

Life Cycle Cost Analysis of Domestic Photovoltaic System

Murat ÖZTÜRK*, Burcu BOZKURT ÇIRAK, Nuri ÖZEK

Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 32260, Çünür, Isparta

Geliş Tarihi/Received : 11.04.2011, Kabul Tarihi/Accepted : 09.10.2011

ÖZET

Kullanım ömrü maliyet analizi özel proseslerin veya kıyaslaması yapılacak proseslerin çevresel etkilerini tanımlayan ve değerlendiren bir sistematik analitik metottür. Sistemin maliyetini belirlemek için; kaynak tüketimini, enerji kullanımını, malzeme ve enerji dengelerini, ham maddeleri kullanılabilir ürünlere çevirme operasyonlarında beşikten mezara şeklinde bir konu olarak ele alır. Bu çalışmada, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız olarak bir evin elektrik ihtiyacını karşılamada kullanılan fotovoltaik enerji sistemlerinin ömür boyu maliyet analizleri hesaplanmıştır. Yapılan parametrik çalışmalara göre, şebekeye bağımlı ve şebekeden bağımsız sistemin yıllık ürettikleri güç miktarı kullanılarak her iki sistem için ömür boyu maliyet sırasıyla 0.40 ve 0.67 \$/kWh olarak bulunmuştur. Aynı zamanda maksimum kapasiteye ulaşıncaya kadar sistemin birim ünitesi başına maliyet elektrik üretim kapasitesiyle azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Fotovoltaik enerji sistemleri, Güneş radyasyonu, Ömür boyu maliyet analizi.

ABSTRACT

Life cycle cost analysis is a systematic analytical method that helps identify and evaluate the environmental impacts of a specific process or competing processes. In order to quantify the costs, resource consumption, and energy use, material and energy balances are performed in a cradle-to-grave manner on the operations required to transform raw materials into useful products. In this study; life cycle cost analysis of photovoltaic energy systems, which using to supply electric for a house, connecting and non-connecting with the grid are calculated for Goller Region climatic conditions. Parametric studies show that, life cycle cost assessment of photovoltaic systems which are connecting and non-connecting with the grid are calculated 0.40 and 0.67 \$/kWh, respectively. Also, it was found that, the costs per unit of capacity decrease with electricity production capacity, until a maximum capacity is reached.

Keywords: Photovoltaic energy systems, Solar radiation, Life cycle cost analysis.

1. GİRİŞ

İnsanoğlu yaşamını sürdürmek ve toplumu oluşturmak için, üç temel girdiye; enerji, madde ve bilgiye ihtiyaç duymaktadır. Enerji; maddenin; örneğin gıdanın, üretilmesi için gereklidir. Bunun yanında, bilgi; işlenmesi ve nakledilmesi için elektrik enerjisini gerekli kılar. Bilgi, aynı zamanda enerjinin verimli kullanılması için de gereklidir. Bu üç unsur, böylece birbiriyle ayrılmaz bir bütünü oluşturmuş olur (KEP, 1998). Enerji, sadece günlük gereksinimlerimizi karşılayan bir araç değil, aynı zamanda; sürekli büyümenin önemli

bir alt yapısı, sürdürülebilir gelişmenin temel parametresi, sosyal ve ekonomik kalkınmanın temel girdisi olarak bilinmektedir. Enerjiye gün geçtikçe daha çok gereksinim duyulması, bununla birlikte dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olması ve sürekli azalması, ülkelerin enerji politikalarını yeniden gözden geçirmeye ve enerjiyi etkin kullanmaya yöneltmiştir. Bilimsel çevreler de enerji dönüşüm araçlarını yeniden değerlendirmeye ve mevcut olan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirmeye çalışmaktadırlar (Utlu ve Hepbaşlı, 2006).

* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : muratozturk@sdu.edu.tr (M. Öztürk)

Halen dünya üzerindeki uygulamaların % 88'i fosil yakıtların yakılması ile gerçekleşmektedir (Lodhi, 1997). Fosil yakıtların kullanımında ise CO_x, NO_x, SO_x, C_xH_x, kurum, kül, katran ve diğer bazı organik bileşikler gibi kirletici emisyonlar ortaya çıkmaktadır (Das ve Veziroğlu, 2001). Bu kirletici emisyonların ortaya çıkmasıyla; asit yağmurları, stratosforik ozon tüketimi, global iklim değişikliği (sera etkisi) gibi dünya üzerindeki yaşamı tehdit eden önemli çevre sorunları meydana gelmiştir. Fosil yakıtların çevre üzerindeki olumsuz etkilerini gidermek amacıyla araştırmalar yapılmaktadır. Alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasının artması seçeneklerden en önemlisini oluşturmaktadır. Ancak, bazı alternatif enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanılmasında, sistemin ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliği ve bu enerji kaynaklarının kesintili, değişken karakteristikleri olmak üzere başlıca iki temel sorunu bulunmaktadır. İlk yatırım maliyetlerinin düşmesi teknolojik gelişme ile ilişkilidir. Teknolojik araştırma ve geliştirme çalışmalarının başarısı, ilk yatırım maliyetlerini etkileyecektir. Özel ve kamu sektörü tarafından yürütülecek araştırmalar, teknolojik gelişmeler için ayrılacak bütçeler, bu teknolojilerin ticarileşmesinde önemli rol oynayacaktır. Alternatif enerji kaynaklarının önemi ülkelerdeki potansiyeline göre değişir. Kuşkusuz alternatif enerji kaynakları içerisinde en güncel olanı ve en çok uygulama alanı bulunanı güneş enerjisidir (Kılıç ve Öztürk, 1980). Güneşten dünyaya bir günde gelen ışık enerjisi, dünyada tüketilen günlük enerjinin yaklaşık on ile onbeş bin katı kadardır (Kızıroğlu, 2005).

Güneş enerjisi, yeni ve alternatif bir enerji kaynağı olmasının yanında; insanlık için önemli bir sorun olan çevreyi kirletici atıkların bulunmaması, yerel olarak uygulanabilmesi ve karmaşık bir teknoloji gerektirmemesi gibi üstünlükleri sebebiyle son yıllarda üzerinde yoğun çalışmalar yapıldığı bir konu olmuştur. Güneş enerjisinden elektrik elde etmek için kullanılan teknolojilerden birisi de güneş pilleridir. Güneş pilleri (fotovoltaik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken düzeneklerdir. Güneş pilleri, 1960'larda uzay çağıının teknolojisi olarak ticarileştiği zamanlardan bugüne, hayranlık uyandırıcı bir basitliğe ve mükemmelliğe sahiptir. Son

on yılda, pazarını cep telefonlarından sonra, en hızlı büyüyen endüstriyel ürünlerden bir tanesidir. Güneş pili sistemlerinin kullanıldığı tipik uygulama alanlarından bazıları; haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri, petrol boru hatlarının katodik korunması, metal yapıların (köprüler, kuleler v.b) korozyondan korunması, elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan tele metrik ölçümler, bina içi ya da dışı aydınlatma, dağ evleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde tv, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması, tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompajı, deniz fenerleri, ilkyardım, alarm ve güvenlik sistemleri, deprem ve hava gözlem istasyonları, ilaç ve aşı soğutma, hava gözlem istasyonları, uzay çalışmaları, uyduların enerji ihtiyaçlarının karşılanması, bazı yerleşim merkezlerinde şebekeye bağlı olarak elektrik üretilmesi şeklinde sıralanabilir. Kullanım alanları ve kullanıcı kitleleri büyük bir hızla artan güneş pilleri konusunda araştırmalar, yoğun bir şekilde devam etmektedir. Günümüz elektronik ürünlerinin çoğunda olduğu gibi, güneş pilleri de yarıiletken maddelerden yapılırlar. Bu yüzden çalışma ilkeleri yarıiletken teknolojisine dayanır. Yapılarının anlaşılıp, verimlerinin artırılabilmesi için öncelikle, yarıiletken maddelerin özelliklerinin bilinmesi gereklidir.

Özel proseslerin veya kıyaslanacak proseslerin çevresel etkilerini tanımlayan ve değerlendiren bir sistematik analitik metot olarak ömür boyu değerlendirme analizi kullanılmaktadır (Öztürk v.d., 2008). Bu analiz, emisyonları ölçmek için kaynak tüketimini, enerji kullanımını, malzeme ve enerji dengelerini, ham maddeleri kullanılabilir ürünlere çevirme operasyonlarında "beşikten mezara" şeklinde bir konu olarak ele alır. Ömür boyu analiz sayesinde enerji üretim teknolojilerinin çevresel faydalarını ve geri dönüşümlerini incelemek için kıyaslama yapılabilir. Ekonomik kararlılığın oluşturulmasında, ömür boyu maliyet analizinin konsepti hem ilk yatırım maliyetlerini ve hem de yıllık işletim maliyetlerini dahil ettiği için enerji üretim sistemlerinin maliyetinin değerlendirilmesinde bu analiz kullanılabilir. Bu çalışmanın amacı, dünya ekolojisine zarar vermeden enerji elde etme konusunda bir umut ışığı olan güneş pillerinin şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız

olarak incelenmesi yapılan bir evin elektrik ihtiyacını karşılamada kullanılan fotovoltaik enerji üretim sistemlerinin ömür boyu maliyet analizlerini hesaplamak ve değerlendirmektir. Ayrıca, tüm ülkemizde ihtiyaç duyulan alternatif enerji kaynakları konusundaki araştırmalara katkıda bulunmaktadır. Güneş pili kullanımının olumlu ve olumsuz tarafları ele alınarak, uygulamaların geleceği konusunda bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Son olarak, dünyadaki enerji sorununa alternatif bir çözüm olarak görülen güneş pillerinin kullanımlarını yaygınlaştırmak amacıyla çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

2. YÖNTEM

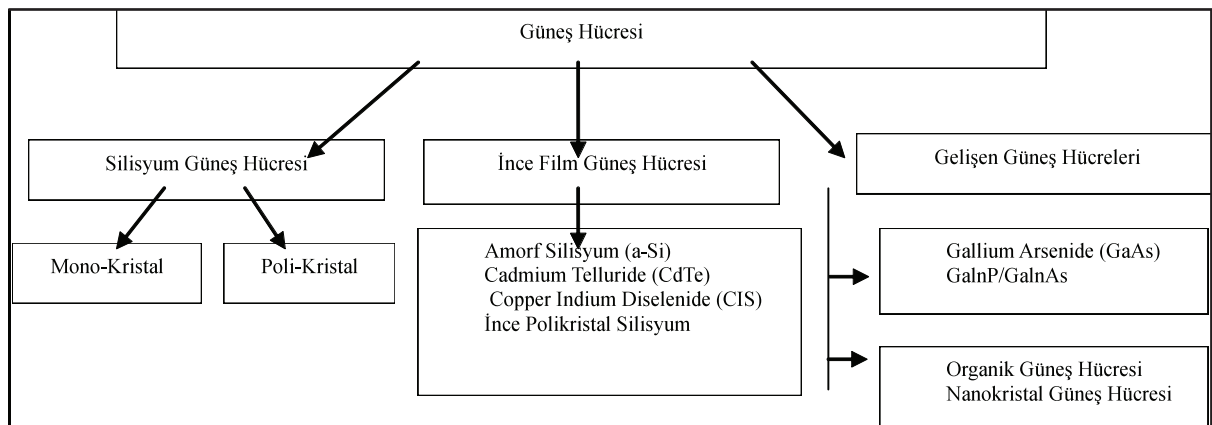
2. 1. Fotovoltaik Sistemler

Güneş ışınları, foton adı verilen enerji paketleri halinde yayılarak, dünyayı ısıtmakta ve aydınlatmaktadır. Yarıiletken maddeler kullanılarak yapılan fotovoltaik (PV) hücreler, üzerine gelen foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elemanlardır. “PV” photovoltaic kelimesinin kısaltmasıdır. “Photo” ışık ve “Voltaic” elektrik anlamına gelmektedir (Messenger ve Ventre, 2005). Kare, dikdörtgen ve daire şeklinde yapılan PV hücrelerin alanları yaklaşık 100 cm² civarındadır. Kalınlıkları özellikle en yaygın olan silisyum PV hücrelerde 0,2-0,4 mm arasındadır. PV hücreler, yüksek

gerilim ve akım elde etmek için seri ve paralel bağlanarak daha güçlü PV modülleri oluşturur. Modüllerin de seri ve paralel bağlanmasıyla oluşan yüksek güçlü yapıya PV dizi adı verilir. Uygun tasarlanmış bir PV sistem az bir ışıkla megawattlarca elektrik üretebilir. Herhangi bir işletme ücreti, enerji kaynağı, gürültülü makineler gerektirmez ve hava kirliliğine sebep olmadan sadece güneş ışığı ile elektrik üretir (EPIA, 2010). Fotovoltaikler DC (doğru akım) üretirler. Bu elektrik;

- Direkt olarak DC gücü ile çalışan aygıtlarda,
- Daha sonra kullanılmak üzere DC depolanarak,
- AC (alternatif akım) dönüştürülerek bu akım ile çalışan aygıtlarda kullanılır.

Güneş hücrelerini silisyum esaslı güneş hücreleri ve bir tabaka üzerine gaz çöktürülerek elde edilen ince film güneş hücreleri olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Bununla beraber halen üzerinde laboratuvar çalışmaları yapılan GaAs ve türevleri, kristal silisyum ince film hücreleri, organik ve nanokristal güneş hücreleri bulunmaktadır (Fonash, 2010). Bunların verimliliği yüksek olmakla beraber üretim maliyetinin yüksek olması kullanımda geniş yer bulamamaktadır. Şekil 1’de güneş hücreleri şematik olarak açıklanmaktadır.



Şekil 1. Güneş hücreleri tipleri.

Uygulama alanlarında, PV sistemlerini şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı sistemler olarak ikiye ayırmak mümkündür. Şebekeden bağımsız sistemler kendi enerji ihtiyaçlarını bizzat kendisi karşılayan sistemlerdir. Genellikle şebekenin bulunmadığı yerlerde kullanımları yaygındır. PV panellerin enerji üretmediği veya üretilen enerjinin yetersiz olduğu durumlarda sisteme bağlı olan aküler devreye girmektedir. Bu tip sistemlerde PV paneller, aküler, şarj regülatörleri ve invertörler bulunmaktadır. Günümüzde çok çeşitli uygulamalarda bu sistemler kullanılmaktadır. Hesap makineleri, saatler, trafik kontrol sistemleri ve şebekeden uzak bölgelerde bulunan binaların elektrik ihtiyacını karşılamak için kurulan sistemler, şebekeden bağımsız PV güç sistemlerine örnek olarak gösterilebilir. Bunlar, akülü veya aküsüz doğru akımla çalışan sistemler olabileceği gibi evirici kullanılarak elde edilen alternatif akımla çalışan sistemler de olabilmektedir (Masters, 2004). Şebekeye bağlı sistemlerde ise yük ihtiyacı, güneş radyasyonu yeterli seviyede iken doğrudan güneş panellerinden sağlanmaktadır. Ancak güneş radyasyonunun azaldığı veya yetersiz olduğu saatlerde gerekli olan yük tüketimi şebeke hattından sağlanır. Genel olarak, şebekeye bağlı bir evin PV sistemi için 3 kW'lık kurulu gücün ve şebekeden bağımsız olduğu durumda ise 6 kW'lık kurulu gücün yeterli olacağı kabul edilmektedir.

2. 2. Ömür Boyu Maliyet Analizi

Temelde alternatif enerji sistemleri, fosil yakıt sistemlerinden farklıdır. Alternatif enerji sistemleri ömrü boyunca alternatif kaynaklar (güneş, rüzgar, biyokütle v.b.) kullanımından kaynaklanan kazancı mutlaka ekonomik analizde yansıtması gerekir. Fosil enerjisi (kömür, doğalgaz, petrol) temelli olan sistemler genellikle daha az ilk yatırım maliyetlerine sahipken ham materyal satın almalarından dolayı yıllık işletim harcamaları nispeten büyüktür. Alternatif enerjili sistemlerinin ise ilk yatırım harcamaları fazladır. Fakat bu sistemlerin kullanım ömrü boyunca fosil enerjisi kökenli enerji tüketim maliyetleri ihmal edilebilir seviyededir. Eğer sistemin seçimi (alternatif enerjiye karşı, fosil kökenli enerji kaynağı) yalnızca ilk yatırım maliyetlerine göre yapılırsa, alternatif enerji sistemleri nadiren seçilecektir. Sonlu yakıtların kullanımını azaltan ve çevre

ile dost alternatif enerjili sistemleri için ilk yatırım-maliyet görüşü, alternatif enerji temelli sistemlerin maliyet hesabı olarak kullanılamaz (Goswami v.d., 2000). Ekonomik kararlılığın oluşturulmasında, ömür boyu maliyet analizinin konsepti hem ilk yatırım maliyetlerini ve hem de yıllık işletim maliyetlerini dahil eder (Curran, 1996). Herhangi bir enerji sistemi için ömür boyu maliyet analizi, sistemin kullanımı boyunca aşağıdaki maliyet bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanır (Gregory, 1994).

1. Ana donanım maliyeti,
2. Arsa maliyeti,
3. İşletim maliyetleri (yakıtlar, işgücü, v.b),
4. Yatırım için para borç olarak alındıysa faizin etkisi,
5. Bakım ve sigorta maliyetleri,
6. Vergiler,
7. Sistemle ilişkili diğer yenilemeler,
8. Hurda değeri (genellikle negatif maliyet).

2. 2. 1. Ömür Boyu Maliyet Analizinin Avantaj ve Dezavantajları

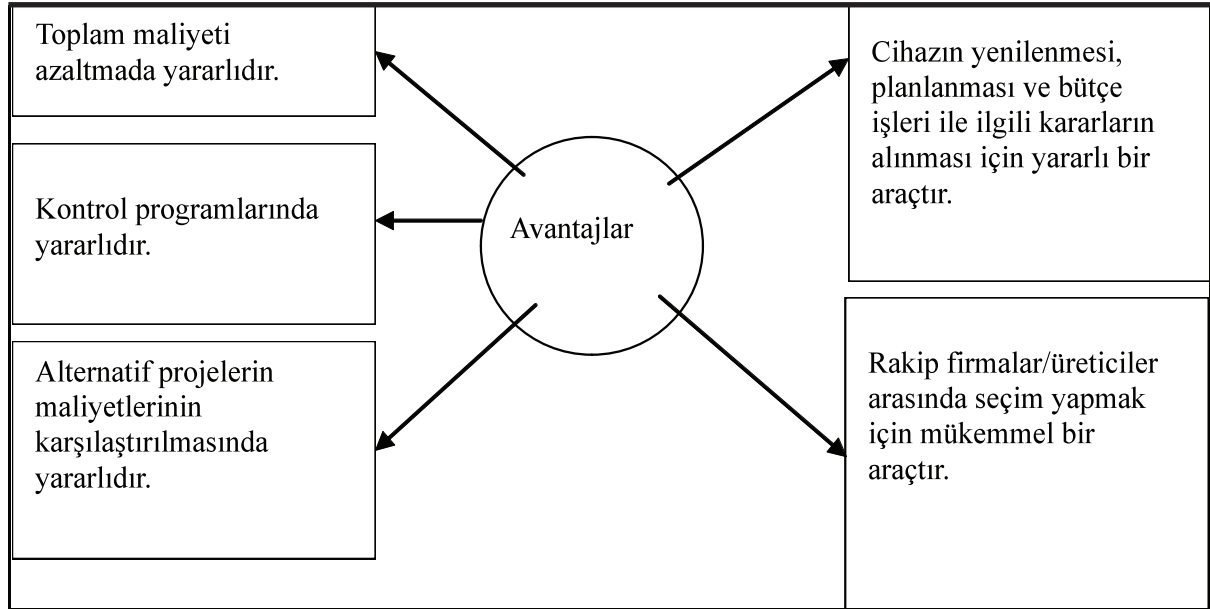
Ömür boyu maliyet analizi henüz bazı alanlarda kullanımı yeni olmasına rağmen, yıllar geçtikçe, ömür boyu maliyet analizinin çeşitli avantajları ve dezavantajları araştırmacılar tarafından belirtilmeye başlanmıştır. Ömür boyu maliyet analizinin bazı avantajları Şekil 2'de verilmiştir. Buna zıt olarak da, ömür boyu maliyet analizinin ana dezavantajları aşağıdaki gibi verilebilir.

- Zaman alıcıdır,
- Bazen maliyetlidir,
- Kesin veri girdisine ihtiyaç duyarlar,
- Analiz için veriler elde edilmeye çalışıldığı zaman uğraştırıcı zorluklar ortaya çıkabilir.
- Ömür boyu maliyet analizi ile ilişkili bazı önemli noktalar ise aşağıda verilmiştir (Dhillon, 2010).
- Ömür boyu maliyet analizinin ana hedefi sınırlı kaynaklardan maksimum fayda sağlamaktır,
- Zaman alan uğraştırıcı çabaların ömür boyu maliyet analizinde, yönetim anahtar rol oynamaktadır,
- Risk yönetimi genel olarak ömür boyu maliyet analizinin özünü oluşturmaktadır.
- Uygun verilerin elde edilmesi iyi bir ömür boyu maliyet analizinin tahmin edilmesinde çok önemlidir,
- Ömür boyu maliyet modeli, maliyet ile ilişkili tüm programları kapsamaludur,
- Ömür boyu maliyetin etkin bir şekilde

- organizasyonu için hem üreticinin ve hem de kullanıcının tanımlanmasına gerek vardır,
- Ömür boyu maliyet fiyatları, tasarım maliyetleri ve progr+,
- İİamın kullanım süresince ortaya çıkan performans arasındaki etkileşimlerinin tanımlanmasına ihtiyaç vardır,
- Kullanılan tahminler çok geçerli olsa bile bazı sürprizler her zaman olabilir,
- Ömür boyu maliyet analizi; tasarım optimizasyonunun geliştirilmesi, stratejik kararların alınması, detaylı değişim çalışmaları gibi çeşitli kazanımları kapsamaktadır.

- Başlangıç maliyeti, donanımın dahil edilmesi, taşınım, kurulum, sistem tasarımcılarının ücreti, özel yapım belirleyicileri ve sistem tarafından kullanılan alanın (arazinin) maliyeti,
- Depozito (peşinat) ve faiz değeri,
- Ömür boyu kullanım zamanı,
- Amortisman miktarı ve son hurda değeri,
- Tamir ve değiştirme masrafları,
- Bakım masrafları,
- Fosil kökenli yakıtların maliyeti,
- Fosil kökenli yakıtların maliyetinin enflasyon oranı,
- Genel enflasyon oranı,
- Vergiler.

Alternatif enerji sistemlerinin ömür boyu maliyetine etki eden parametreler aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Goswami v.d., 2000).



Şekil 2. Ömür boyu maliyet analizinin avantajları.

2. 3. İskontolu Para-Akış Analizinin Prensipleri

2. 3. 1. Yıllık Şimdiki Değer

Sabit para değeri ile ekonomik analiz arasında ilişki kurmak uygun olduğu için şimdiki değer konsepti kullanılmaktadır (Dhillon, 1988). Gelecek para akışının veya ödemenin şimdiki değeri, ödenen paranın zaman değeri ile akışın gelecekteki değeridir. Paranın zaman değeri gelecekte geri dönecek olan çeşitli yatırımlar için fırsatlar sunar ve enflasyondan ayrı etkilenir. Mesela, yıllık faiz oranı (i), ile yatırılan paranın

(P) gelecekteki toplam değeri (X) aşağıdaki gibi hesaplanır (Goswami v.d., 2000).

$$X = P(1+i)^t \quad (1)$$

Burada, "t" yıl olarak ifade edilen gelecekteki zamandır. Denklem (1)'in bildirdiğine göre paranın yıllık toplamı (P), her yıl (genel enflasyonu önemsemeyen) (1+i) faktörünün çarpılması ile değerlendirilir (Dieter, 1983). Alternatif olarak, paranın gelecekteki toplamı (X) aşağıdaki ifade ile verilen şimdiki değere (P) sahiptir.

$$P = \frac{X}{(1+i)^t} \quad (2)$$

Denklem (2)'ye göre gelecekteki para değerinin, şimdiki gelecekteki her yıl için, sabit para bazında $(1+i)^{-1}$ faktörü ile çarpılarak bulunur. $(1+i)^{-t}$ faktörü, şimdiki değer faktörü (Present Worth Factor, PWF) olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi verilir (Dhillon, 2010).

$$PWF(i,t) = \frac{1}{(1+i)^t} \quad (3)$$

Bu çalışmada yapılan ömür boyu maliyet analizinde, şimdiki değer yaklaşımı toplam ömür boyu maliyetlerin oluşturulmasının yerine kullanılmıştır. Bu yaklaşımın anlamlı sonuca varmada daha yararlı olduğu görülmektedir. Çünkü, para toplam bazında değil de yıllık bazda değerlendirildiği zaman daha anlamlı olmaktadır. Yatırım toplamının gelecek değeri, enflasyon etkisinin yıllık faktörü $(1+j)$ ile gelecekteki değeri azalmaktadır. Burada, j yıllık enflasyon miktarını göstermektedir. Denklem (1)'de verilen gelecekteki değer (X) enflasyonu hesaba dahil ederek aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$X = P \left(\frac{1+i}{1+j} \right)^t \quad (4)$$

Alternatifsel olarak, enflasyon altındaki gelecekteki değer toplamının (X) şimdiki değeri (P) aşağıdaki şekilde de verilebilir.

$$P = \frac{X}{[(1+i)/(1+j)]^t} \quad (5)$$

Eğer efektif faiz oranı (i') Denklem (6)'daki gibi hem faiz ve hem de enflasyon etkilerini içerirse paranın şimdiki değeri Denklem (7) ile ifade edilebilir.

$$i' = \frac{1+i}{1+j} - 1 = \frac{i-j}{i+j} \quad (6)$$

$$P = \frac{X}{(1+i')} = XPWF(i',t) \quad (7)$$

2. 3. 2. Ödemenin Serileri

Borcun ödenmesinde, yıllık ve aylık toplamları için her hangi bir ekonomik analiz serisi kullanılır (Sarma ve Adeli, 2002). Tek ödmeden, ödemelerin serilerine kolayca dönüştürülebilir. Eğer P_{ann} toplamı faiz oranında (i) her yıl yatırılan para ise, bu ödemelerin toplamının şimdiki değeri (S) aşağıdaki gibi hesaplanır (Goswami v.d., 2000).

$$S = \frac{P_{ann}}{1+i} + \frac{P_{ann}}{(1+i)^2} + \frac{P_{ann}}{(1+i)^3} + \dots \quad (8)$$

$$S = P_{ann} [(1+i)^{-1} + (1+i)^{-2} + (1+i)^{-3} + \dots] \quad (9)$$

Parantez içindeki ifadeler $P_{ann}/(1+i)$ ilk terim ve $(1+i)^{-1}$ oranı geometrik serilerdir. Bu serilerin toplamı için elde edilen ifadeden aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$S = P_{ann} \left[\frac{1 - (1+i)^{-t}}{i} \right] \quad (10)$$

Alternatifsel olarak toplam miktar formuna (S) ihtiyaç duyan, yıllık ödeme (P_{ann}) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{ann} = S \left[\frac{i}{1 - (1+i)^{-t}} \right] \quad (11)$$

Denklem (11)'de ki köşeli parantez içindeki terim yatırım geri dönüşüm (ikame) faktörü (Capital Recovery Factor, CRF) olarak isimlendirilir.

$$CRF(i,t) = P_{ann}/S = \frac{i}{1 - (1+i)^{-t}} \quad (12)$$

2. 4. Alternatif Enerji Sistemlerinin Ömür Boyu Maliyet Analizi

Ömür boyu maliyet analizi aslında ömür boyu kullanım periyodu boyunca yıllık maliyetlerin toplamları ile ilgili olmasına rağmen, daha çok yıllık temeldeki ömür boyu kullanım maliyetleri ile ifade edilir. Her iki yaklaşımda temelde birbirine benzerdir.

2. 4. 1. Alternatif Enerji Sistemlerinin İlk Yatırım Maliyeti

Alternatif enerji sistemlerinin maliyeti iki türdür. Eğer maliyetler kurulacak olan sistemin boyutuna bağlı ise, bunlara değişken maliyetler denilmektedir. Örnek olarak kollektör, depolama, ısı değiştiriciler, pompalar gibi materyaller verilebilir. Sistem boyutundan bağımsız olan maliyetlere ise sabit maliyetler denilmektedir. Mesela kontroller, bazı iş gücü maliyetleri, güneş bileşenleri için kullanılan yapı, zemin alanı gibi. Güneş kollektör alanı sistem boyutunun genel bir ifadesi olduğu için, değişken maliyetler genellikle kollektörün birim alanı başına maliyeti olarak ifade edilir. Bu ifadeye en güzel örneklerden bir tanesi olarak depolama sistemleri verilebilir. Depolama kg veya m³ biriminde ölçülürken genellikle fiyatı \$/mc³ olarak verilir. Burada c kollektörü göstermektedir. Tabii ki, sabit değerler sistem boyutuna bağlı değildir ve genellikle \$ olarak ifade edilir. Birçok durumda yukarıda listelenilen ilk yatırım maliyetleri aylık veya yıllık yatırımlar olarak ödenmektedir. Periyodik ödemenin büyüklüğü; başlangıç yatırım maliyetine CRF değerinin uygulanması ile bulunur. Bu periyodik maliyetler, daha önce tanımlanan gelecek maliyetlerle birleşik olarak,

güneş enerjisinin toplam yıllık maliyetinden oluşmaktadır.

2. 4. 2. Alternatif Enerji Sistemlerinin Gelecek Maliyetleri

Alternatif enerji sistemlerinin kullanım ömrü boyunca ortaya çıkan maliyetlerine, gelecek maliyetler olarak tanımlanır. Bu tip maliyetler bakım, tamir, yenisi ile değiştirme, enerji masrafları, vergiler ve sigorta giderlerini kapsar. Bu değerler mutlaka kendilerine ait gelecek değer faktörünün uygun değerleri ile şimdiki değerlerine dönüştürülmelidir. Kurulum ve tamir maliyetleri alternatif enerji sisteminin uygulamaları ile değişmektedir.

2. 4. 3. Alternatif Enerji Sistemlerinin Yıllık Maliyetleri

Yıllık temele bağlı olarak alternatif enerji sistemlerinin toplam maliyeti (Cy) şimdiki değer temeline bağlı olarak ifade edilen amortize edilmiş ilk yatırım maliyetlerini ve dağıtım maliyetlerini kapsar (Goswami v.d., 2000). Yıllık güneş maliyetleri (Cy) aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
 C_y = & (C_{s,tot} - ITC)CRF(i',t) && \text{İlk yatırım maliyeti} \\
 & - C_{s,salv}PWF(i',t)CRF(i',t) && \text{Hurda değeri} \\
 & + \left[\sum_{k=1}^t R_k PWF(i',t_k) \right] CRF(i',t) && \text{Yenisi ile değiştirme (yenileme)} \\
 & + C_e \frac{CRF(i',t)}{CRF(i'',t)} && \text{Enerji} \\
 & + T_{prop} C_{s,ass} && \text{Mülk vergisi} \\
 & - T_{inc} T_{prop} C_{s,ass} && \text{Mülk vergisi, vergi indirimi} \\
 & - T_{inc} i_m \left[\sum_k \frac{P_k}{(1+i)^k} \right] CRF(i',t) && \text{Faiz, vergi indirimi} \\
 & + M && \text{Bakım} \\
 & + I && \text{Sigorta} \\
 & + C_{s,Dec} x PWF(i',t) x CRF(i',t) && \text{Görevi sonlandırma}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Burada;

$C_{s,tot}$:	Satış vergilerini de içeren toplam ilk sistem yatırımı,
$C_{s,sah}$:	Analizin periyodunun sonunda sistemin hurda değeri,
$C_{s,ass}$:	Sistemin tahakkuk edilmiş değeri,
C_e	:	Bir yılda sistemi işletmedeki enerji maliyeti,
$i' = (i - j)/(i + j)$:	Efektif faiz miktarı,
$i'' = (i - j_e)/(i + j_e)$:	Enerji için faiz iskonto miktarı,
i	:	Faiz miktarı,
M	:	Bakım maliyeti (\$/yıl),
j	:	Genel enflasyon miktarı,
i_m	:	Market ipotek miktarı (gerçek ipotek miktarı+genel enflasyon miktarı),
j_e	:	Enerji enflasyon değeri (\$/yıl),
k	:	Yeniden yerleşimin veya tamirin yapıldığı yıl (i, j ile ilişkili olarak herhangi bir artışı göstermektedir),
I	:	Sigorta masrafı (\$/yıl),
ITC	:	Yatırım vergi kredisi,
R_k	:	k yılındaki yenisi ile değiştirme maliyetleri (bazen $R_k=0$ olur) (\$/yıl),
P_k	:	k yılındaki $C_{s,tot}$ 'nun ödenmemiş bakiyesi,
t	:	Analizin ömür boyu kullanım zamanı ve periyodu (yıl),
T_{prop}	:	Mülkün vergi miktarı,
T_{inc}	:	Vergi miktarı,
$C_{s,Dec}$:	Görevi sonlandırma maliyeti (\$).

Denklem (13)'ün yedinci terimindeki toplam k yılı boyunca ödenmemiş bakiye (P_k) aşağıdaki gibi değerlendirilebilir.

$$P_k = C_{s,tot} \left[(1 + i_m)^{k-1} + \frac{(1 + i_m)^{k-1} - 1}{(1 + i_m)^{-1} - 1} \right] \quad (14)$$

Şimdiki değer toplamı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$i_m \sum_k \frac{P_k}{(1 + i)^k} = C_{s,tot} \left\{ \frac{CRF(i_m, t)}{CRF(i, t)} + \frac{1}{1 + i_m} \frac{1}{CRF\left(\frac{i - i_m}{1 + i_m}, t\right)} [i_m - CRF(i_m, t)] \right\} \quad (15)$$

Denklem (13)'de ki terimler gerçek ödemelerin iki tipini sunmaktadır. Bundan dolayı zaman içinde sabit kalmakta ve çeşitli olmaktadır. Mesela; kurulum, sigorta, mülk vergisi analizin periyodu (t) için genellikle aynı, sabit dolarda

olmaktadır. Eğer gerçek eskalasyon beklenirse, bu terimler Denklem (13)'ün enerji (dördüncü) terimi olarak kolayca ele alınabilir. Denklem (13)'ün ilk yatırım maliyeti (birinci) terimi yıllık temelde alternatif enerji sisteminin amortisman değerini sunmaktadır. Bu maliyeti dengeleme eğilimi, hurda değeri (ikinci) terim olup PWF değerinin kullanımı ile şimdiki değere azaltıldığı zaman bu terim görev olarak işlev görmektedir. Tamir ve yenisi ile değiştirme (R_k) iyi tasarlanmış sistem için küçük ve seyrek fiyatlar olarak değerlendirilebilir. İyi tasarlanmış sistem ise k yılı için PWF'yi kullanarak bunların ilişkili olduğu şimdiki değere azaltılır. Alternatif enerji sisteminin işletimi için enerji ihtiyaçları (genellikle sadece elektrik) genel enflasyon miktarından (j) farklı olarak j_e miktarındaki fiyatta arttırılır. Bundan dolayı sermaye geri dönüşüm faktörlerinin oranı işletilen enerjinin şimdiki değerini belirlemede gereklidir.

Alternatif enerji sisteminin borçlanmasının ödenmemiş maliyeti, sistemin ömür boyu kullanımı boyunca kesinti yapılan faiz vergisi yıldan yıla azalır (Wies v.d., 2005). Bahsedilen bu durum Denklem (15)'deki ifade ile verilmiştir. Bu ifade ile piyasa ipotek miktarı (i_m) ile çarpıldığı zaman k yılı için faiz ödemesi bulunur. Faiz maliyetinin kesri yatırımcıya vergi desteğine bağlı olarak düşürülebilir. Alternatif sisteminden, mülkün değer sonucunun ekstra değerlendirilmesine bağlı olarak mülk vergileri ($C_{s,ass}$) benzer olarak kısmen düşürülebilir. Genel enflasyon periyodu boyunca, fiyat endeksi sabit dolardan bunları azaltmada yıllık vergi düşürülmesine uygulanmalıdır. Bu enflasyon etkisini değerlendirmenin eğilimi vergi miktarını (T_{inc}) arttırır. Birçok durumda peşinat (depozito) (D_s) alternatif enerji sistemi için ipoteğin miktarını azaltacaktır. Yıllık alternatif enerji sisteminin maliyet denklemi, iki terimle birlikte ilk terim yeniden yazılarak ipoteğin (D_s) dahil edilmesi ile düzenlenebilir.

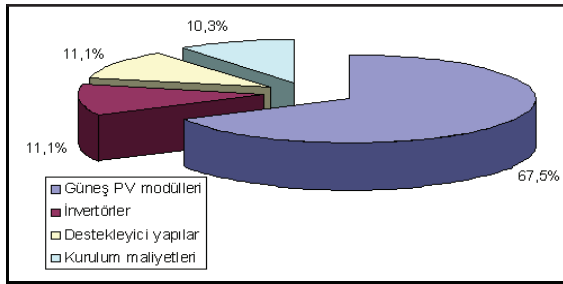
$$(C_{s,tot} - D_s) CRF(i', t) + \frac{D_s i'}{(1 + i')^t - 1} \rightarrow C_{s,tot} CRF(i', t) \quad (16)$$

Benzer olarak Denklem (13)'deki vergi indirimi (yedinci terim) ($C_{s,tot} - D_s$) ile $C_{s,tot}$ değiştirilerek ifade edilir. Yatırım vergi kredisi bir yılda oluşan negatif maliyet olarak ele alınır.

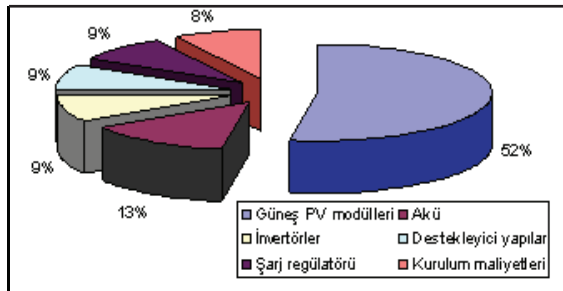
3. DEĞERLENDİRME

3. 1. Fotovoltaik Sistemlerin Ömür Boyu Maliyet Analizi

Güneş PV sisteminin maliyetini hesaplanmada, güneş PV modülleri için $5 \$/W_p$, invertörler için $0.83 \$/W_p$, şarj regülatörü için $0.83 \$/W_p$ ve akü içinde $1.32 \$/W_p$ güncel piyasa fiyatları (Solarbuzz, 2010) kullanılmıştır. Destekleyici yapıların ve kurulumların maliyetleri bir proje maliyetlerinden (BCA, 2004) adapte edilerek, $1.63 \$/W_p$ alınmıştır. Şebekeye bağımlı PV sistemin toplam yatırım maliyeti yaklaşık olarak $7.5 \$/W_p$ hesaplanmıştır. Şekil 3'de şebekeye bağımlı sistemin parçalarının maliyet dağılımları gösterilmiştir. Şebekeden bağımsız PV sistemin maliyeti ise sistemde akü kullanım giderleri olduğu için $9.5 \$/W_p$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4'de şebekeden bağımsız PV sisteminin parçalarının maliyet dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 3. Şebekeye bağımlı PV sisteminin yatırım maliyetinin dağılımı.

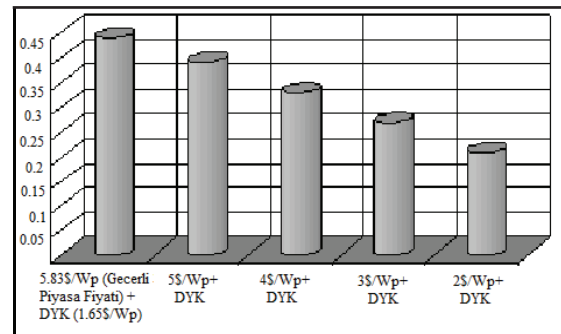


Şekil 4. Şebekeden bağımsız PV sisteminin yatırım maliyetinin dağılımı.

İşletim fazında yakıt tüketimi olmadığı için, PV sistemlerinde enerji maliyetleri yoktur. PV sistem düzenli bir bakım istememesine rağmen, PV modüllerinin iki haftada bir temizlenmesi PV modüllerinin üzerinde bulunan tozların

veya kirlı tortuların oluşmasını engelleyecektir (Öztürk, 2009). Bakım ve onarım maliyetlerinin tüm yatırım maliyetinin % 0.17'si olduğu kabul edilmiştir. PV sisteminin sökülmesi ve parçalara ayrılmasının maliyeti yaklaşık olarak 750 \$ alınmıştır. Güneş PV modüllerinin herhangi bir hurda değerinin olmadığı kabul edilmiştir. Bunun yerine, burada güneş PV modüllerini elden çıkartma maliyetleri alınabilir. Fakat bilgi yokluğundan dolayı bu tip maliyetler hesaplamaya dahil edilmemiştir. Ancak, PV sistemlerinin hurda değerinin sistemin toplam yatırımın yaklaşık % 10'unu olduğu kabul edilmiştir. Hurda değeri, güneş PV modüllerinin alüminyum destekleme yapıların ve alüminyum iskeletin geri dönüşüm maliyeti olarak alınmıştır (yeniden dönüşümde alüminyumun tonununun 860 \$ olduğu piyasa değerine göre hesaplanmıştır). Görevi sonlandırma fazında verilen bu hurda değeri net maliyette % 1'lik indirim miktarı olarak hesaplanmıştır. Şebekeye bağımlı ve şebekeden bağımsız bir evin için tasarımı yapılan PV sisteminin ömür boyu maliyet analizlerinin sonuçları, Denklem (13) ve çalışmada verilen değerler kullanılarak sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Şebekeye bağımlı ve şebekeden bağımsız sistemin yıllık ürettikleri güç miktarı kullanılarak her iki sistem için ömür boyu maliyet sırasıyla 0.40 ve 0.67 $\$/kWh$ olarak bulunmuştur. Her iki PV sistemin maliyeti üzerine çeşitli senaryolara göre güneş-PV sisteminden üretilen elektriğin ömür boyu maliyet analizlerinin karşılaştırılması Şekil 5'de verilmiştir. PV sistemi için $\$/W_p$ üretim maliyetlerinin 5-2 $\$/W_p$ aralığında değiştiğinde PV sisteminden üretilen elektriğin ömür boyu maliyet ise 0.425-0.21 $\$/kWh$ aralığında değişmektedir. Burada güneş gözelerinin piyasa fiyatları değiştirilmiş, destekleme yapılarının kurulumu (DYK) olan $1.68 \$/W_p$ değeri sabit alınmıştır.



Şekil 5. Güneş PV sisteminin ömür boyu maliyeti.

Tablo 1. Şebekeye bağımlı sistemin ömür boyu maliyet analizi.

Terim tipi	Analitik ifade	Değer (\$/yıl)
Yıllık ilk yatırım maliyeti	$C_{s,tot} \times CRF(i', t_{25})$	2250
Hurda değeri	$C_{s,salv} \times PWF(i', t_{25}) \times CRF(i', t_{25})$	-225
Tamir ve bakım		
1. 10 yıllık	$R_{10} \times PWF(i', t_{10}) \times CRF(i', t_{10})$	18
2. 10 yıllık	$R_{20} \times PWF(i', t_{20}) \times CRF(i', t_{20})$	8
Görevi sonlandırma	$C_{s,Dec} \times PWF(i', t_{25}) \times CRF(i', t_{25})$	54
TOPLAM		2105

Tablo 2. Şebekeden bağımsız sistemin ömür boyu maliyet analizi.

Terim tipi	Analitik ifade	Değer (\$/yıl)
Yıllık ilk yatırım maliyeti	$C_{s,tot} \times CRF(i', t_{25})$	4012
Hurda değeri	$C_{s,salv} \times PWF(i', t_{25}) \times CRF(i', t_{25})$	-401
Tamir ve bakım		
1. 10 yıllık	$R_{10} \times PWF(i', t_{10}) \times CRF(i', t_{10})$	18
2. 10 yıllık	$R_{20} \times PWF(i', t_{20}) \times CRF(i', t_{20})$	8
Görevi sonlandırma	$C_{s,Dec} \times PWF(i', t_{25}) \times CRF(i', t_{25})$	54
TOPLAM		3691

4. SONUÇ

Alternatif enerji kaynaklarının en önemlisi güneş enerjisidir. Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli açısından çok önemli bir yere sahiptir. Ülkemizdeki uygulamaların dünya ortalamasının altında kalmasına rağmen, önümüzdeki yıllarda büyük artışların gerçekleşmesi beklenmektedir. Bunun nedenleri artan enerji ihtiyacını karşılamada yeni teknolojilerin kullanıma dahil edilmesi, çevreye duyarlı enerji üretim sistemlerine duyulan isteklerin artması, en önemlisi de enerji kaynağı olarak güneş gibi sonsuz bir kaynağın kullanılmasıdır. Yapılan çalışma ile evsel uygulamalarda gerekli olan elektrik enerjisinin alternatif enerji kaynakları içinde en önemli yere sahip olan güneş enerjisinden karşılanması için burada önerilen şebekeden bağımsız ve şebekeye bağımlı fotovoltaik güneş pili sistemlerinin ömür boyu maliyet analizleri yapılmış ve aşağıda maddeler halinde verilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Bir tesisin tasarım uygulamasından önce yatırım ve üretim maliyetlerinin belirlenmesi önemli bir adımdır. Ayrıca farklı alternatiflerin karşılaştırılabilmesi için tahmin tekniklerinin

tutarlı olması gerekmektedir.

- Konutlar için gerekli olan elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasında şebekeye bağımlı fotovoltaik güneş pili sistemi kullanıldığında yatırımın ömür boyu maliyeti 3691 \$'dan 2105 \$'a düşmektedir.
- Başka bir ifadeyle, parametrik çalışmaları yapılan fotovoltaik sistemlerin yıllık ürettikleri güç miktarı dikkate alındığında, şebekeye bağlı sistem kullanılması ile kWh başına maliyetin 0.67 \$/yıl'dan 0.40 \$/yıla düştüğü görülmüştür.
- Destekleme yapılarının kurulum maliyeti sabit alınmak üzere, PV sistemi için üretim maliyetlerinin günümüzdeki yaklaşık 5,83 \$/Wp değerinden 2020 yılına kadar arzu edilen 2 \$/Wp değerine düştüğünde PV sisteminden üretilen elektriğin ömür boyu maliyet ise kWh başına 0.425 \$ değerinden 0.21 \$'a düşmektedir.
- Yapılan duyarlılık analizi sonuçlarına göre satın alınan toplam ekipman maliyeti genel ekonomik analiz sonuçları üzerine önemli bir etkiye sahiptir.
- Düşük tamir ve bakım giderleri dikkate alındığında, fotovoltaik sistemler elektrik üretmek için pratik teknolojiyi insanoğlunun hizmetine sunmaktadırlar.

5. KAYNAKLAR

- BCA, Photovoltaic demonstration projects. 2004. [http://www.neec.gov.sg/renewables/BCA%20PV%20Project%20\(2004\).doc](http://www.neec.gov.sg/renewables/BCA%20PV%20Project%20(2004).doc).
- Curran, M.A. 1996. Environmental Life Cycle Assessment, McGraw-Hill, New York.
- Das, D., Veziroglu, T.N. 2001. Hydrogen Production by Biological Processes: A Survey of Literature, International Journal of Hydrogen Energy. 26, 13.
- Dhillon, B.S. 1988. Life Cycle Costing, Gordon and Breach science Publishers, New York.
- Dhillon, B.S. 2010. Life Cycle Costing for Engineers, CRC Press, New York.
- Dieter, G.E. 1983. Engineering Design, New York, McGraw-Hill Book Company.
- EPIA, 2010. European Photovoltaic Industry Association. "Annual Report", 11.
- Fonash, S. 2010. Solar Cell Device Physics, Academic Press, New York.
- Goswami, D.Y., Kreith, F., Kreider, J. F. 2000. Principles of Solar Engineering. Taylor and Francis, New York.
- Gregory, A.K. 1994. The Application of Life Cycle Assessment to Design, Journal of Cleaner Production. 1 (3-4), 143-149.
- KEP, 1998. Kyushu Electric Power Co. Ltd., Energy Management in Power Plants, JICA and KITA, Japonya.
- Kılıç, A ve Öztürk, A. 1980. Güneş Enerjisi, Kipaş Dağıtım. 331 s.
- Kiziroglu, İ. 2005. Alternatif Enerji Kaynakları İnsanlığı Kurtaracak, Popüler Bilim Dergisi. 12 (50-54).
- Lodhi, M.A.K. 1997. Photovoltaics and Hydrogen Future Energy Options, International Journal of Energy Conversion and Management. 38 (1881).
- Masters, G. M. 2004. "Renewable and Efficient Electric Power Systems", Stanford University Kanada, 474.
- Messenger, R. A., Ventre, J. 2005. "Photovoltaic Systems Engineering, Second Edition", Taylor & Francis e-Library, 57, 76, 394, 395.
- Öztürk, M., Bezir, N.Ç., Özek, N. 2008. Güneş Havuzlarının Kullanım Ömrü Maliyet Analizi. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14 (2), 247-252.
- Öztürk, M. 2009. Hidrojen Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Sarma, K.C., Adeli, H. 2000. Fuzzy Discrete Multi-Criteria Cost Optimization of Steel Structures, Journal of Structural Engineering (ASCE), 126 (11), 1339-1347.
- Solarbuzz, Solar module and inverter price. 2010. <http://www.solarbuzz.com>.
- Utlu, Z., Hepbaşlı, A. 2006. Energetic and Exergetic Assessment of the Industrial Sector at Varying Dead (Reference) State Temperatures: A Review with an Illustrative Example. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 12 (5), 1277-1301.
- Wies, R.W., Johnson, R.A., Agrawal, A.N. 2005. Life Cycle Cost Analysis and Environmental Impacts of Integrating Wind Turbine Generators (WTGs) into stand-alone hybrid power systems. WSEAS Transactions on Systems, 4 (9), 1383-1393.