

1. ULUSAL YAPI FİZİĞİ VE ÇEVRE KONTROLÜ KONGRESİ

Bildiriler Kitabı

13-14 Mart 2014 ■ İTÜ Taşkışla, İstanbul

Yapı Fiziği Derneği
Association of Building Physics

1. Ulusal Yapı Fiziği ve Çevre Kontrolü Kongresi
13-14 Mart 2014 İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul

BİR KONUT BİNASI ÖRNEĞİNDE PV SİSTEMLERE İLİŞKİN ENERJİ PERFORMANS GÖSTERGELERİNİN HESAPLANMASI

Y.Mimar Suzi Dilara Mangan[a]
Prof.Dr. Gül Koçlar Oral[b]
İTÜ Mimarlık Fakültesi
Taşkışla, Taksim, İstanbul, 34437

ÖZET

Fosil yakıt kaynak kullanımını ve dolayısıyla da CO_2 salımını azaltabilmesinden ötürü hızlı bir büyüme gösteren fotovoltaik (PV) sistem, yenilenebilir enerji kaynağı güneşi kullanarak elektrik enerjisi üreten bir teknolojidir. Ancak, PV sistemin tüm yaşam döngüsü dikkate alındığında pek çok sistem bileşeninin üretimi için çok fazla miktarda enerji harcanmaktadır. Bu nedenle, PV sistem yaşam döngüsü enerji analizleri, yenilenemez fosil yakıt kullanımını esas alan teknolojilere karşı solar teknoloji kullanımına ilişkin çevresel potansiyelin incelenmesi ve değerlendirilmesi için önemli bir araçtır. Bu çalışma ile PV teknolojisine ilişkin çevresel etkinin ve dolayısıyla sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Türkiye'nin sıcak nemli iklim bölgesi temsili ili Antalya, ılımlı nemli iklim bölgesi temsili ili İstanbul ve soğuk iklim bölgesi temsili ili Erzurum'da yer aldığı kabul edilen bir konut binasının çatı ve cephe alanına uygulanmış PV sistemler için yapılan yaşam döngüsü enerji analizleri sunulmuştur. Bu çalışmada, her bir PV sistemin enerji performansının değerlendirilebilmesi amacıyla hem enerji geri ödeme süresi ve enerji getirisi faktörü gibi temel enerji göstergeleri hem de CO_2 salımı azaltım potansiyeli gibi çevresel göstergelerin dikkate alındığı yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Fotovoltaik sistemler, Yaşam döngüsü enerji analizi, Enerji ve çevresel göstergeler

ABSTRACT

Photovoltaic(PV) system is a technology for the production of electricity using renewable energy source of sun that is rapidly increasing through its capability to reduce the energy consumption from fossil-fuel sources and consequently to decrease the CO_2 emission. However, considering the whole life cycle of PV system, a great amount of energy during the manufacturing and assembly of the most of the system components is consumed. Thus, the life-cycle energy analysis of photovoltaic (PV) systems is an important tool to investigate and evaluate the environmental potential of using solar technologies versus especially the technologies based on non-renewable fossil fuel sources. This study aims to evaluate the environmental impact and therefore the sustainability of PV technology. The life-cycle energy analyses for roof-mounted PV system and PV facade system concerning a residential building which is assumed in Antalya, Istanbul and Erzurum, respectively representative cities of hot humid, temperate humid and cold climate zones of Turkey were presented. In this study, the life cycle analyses were carried out to evaluate the overall energy performance of each PV system in terms of both of basic energy indicators such as energy payback time and energy return factor and environmental indicator such as the potential for CO_2 emission.

Key words: Photovoltaic systems, Life cycle energy analysis, Energy and environmental indicators

[a] e-posta adresi: dilaramangan@yahoo.com
[b] e-posta adresi: gkoclaroral@gmail.com

1.GİRİŞ

Artan dünya nüfusunun enerji talebinin karşılanmasında öncelikli rol oynayan fosil yakıtların azalması, fosil yakıt tüketimine bağlı çevresel sorunların artış göstermesi ve yüksek enerji fiyatları, farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunması ve kullanılmasına yönelik küresel bir kabulun oluşmasına neden olmuştur. Yaşanılan bu enerji sorununun giderilmesi amacıyla ele alınan yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisi, hem çevre açısından daha yararlı hem de sürdürülebilir kalkınma programlarının temel bir bileşeni olmasından ötürü diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha önemli bir yer tutmaktadır [1]. Son yıllarda, pek çok ülke, çevre korunumuna ilişkin düzenlenen yasalar ile küresel olarak zorunlu kılınan yükümlülükleri yerine getirebilmek ve Kyoto protokolünde belirtilen hedeflere ulaşabilmek amacıyla yenilebilir enerji teknolojilerinin kullanımını ve özellikle güneş enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üreten fotovoltaik (PV) teknolojisini teşvik edecek politikalar geliştirmektedir [2]. 2003 yılından beri özellikle Avrupa'da PV teknolojisi kullanımına ilişkin yürütülen enerji politikaları ve tanımlanan teşvik programlarına bağlı olarak PV teknolojisinde hızlı bir gelişme yaşanmaktadır. 2012 yılı içerisinde 70GW'tan fazla kurulumun gerçekleştiği ve dünyanın toplam PV kapasitesinin %70'ini temsil eden Avrupa, dünyada toplam kurulu PV kapasitesi açısından lider konumdadır [3].

PV teknolojisinin sürdürülebilir enerji sistemine büyük oranda katkı sağlayabilecek bir potansiyele sahip olmasına ve dolayısıyla olası CO_2 salımlarını azaltabilmesine rağmen pek çok sistem bileşenlerinin üretimi evresinde çok fazla miktarda enerji harcanmaktadır. Harcanan bu enerji nedeniyle, PV teknolojisinin çevre üzerinde doğrudan (evre içerisinde salımlar) ya da dolaylı (üretim evresindeki fosil yakıt tüketimi) etkileri mevcuttur. Bu nedenle, PV sistemlerin çevresel sürdürülebilirliğinin doğru olarak değerlendirilebilmesi için tüm yaşam döngüsüne yönelik enerji analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. PV sistemlerin enerji performansının değerlendirilmesi amacıyla genellikle enerji geri ödeme süresi ve enerji getirisi faktörü gibi enerji göstergeleri ve CO_2 salımı azaltım potansiyeli gibi çevresel göstergeler kullanılmaktadır.

Enerji geri ödeme süresi ve enerji getirisi faktörü, kurulan PV sistemden elde edilen yıllık enerjinin PV sistemlerin üretim evresinde tüketilen enerjiye oranıdır. PV sistemler için üretim evresinde harcanan enerji coğrafik konuma göre büyük oranda değişmemesine rağmen PV sistemin kullanım evresinde üreteceği enerji miktarı coğrafik konuma göre değişen iklimsel koşullara (örn.güneş ışınımı ve yerel sıcaklık değerleri) bağlı olarak önemli farklılıklar göstermektedir. CO_2 salımı azaltım potansiyelinin hesaplanmasında ise, PV sistemlerden üretilen enerji değerine ek olarak enerji karşımı içerisindeki CO_2 değeri de dikkate alınmaktadır. Bu nedenle, PV sistemlerin enerji performansları ülke bazında değerlendirilmeli, farklı iklimsel koşulların mevcut olduğu ülkeler için ise PV sistemlerin en yüksek enerji üretebilme potansiyeline sahip olduğu iller dikkate alınmalıdır[4].

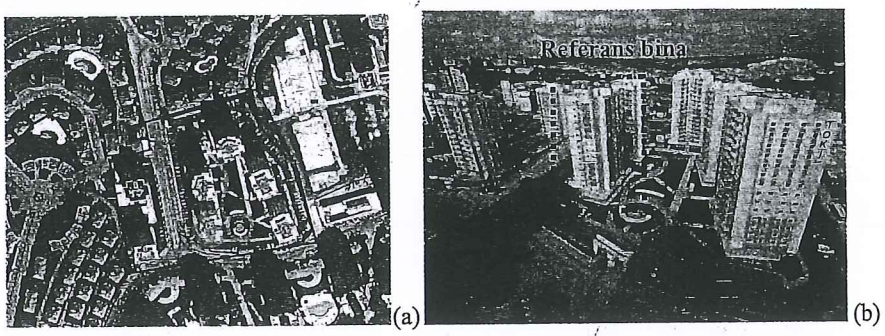
Bu bağlamda, yapılan bu çalışma ile Türkiye'de kurulu PV sistemlerden elde edilebilecek elektrik enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin sağlayacağı çevresel sürdürülebilirliğin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ele alınan konut binasının, Türkiye'nin farklı güneşlenme süresi ve güneş ışınım şiddetine sahip sıcak nemli, ılımlı nemli ve soğuk iklim bölgelerinin temsili illeri sırasıyla Antalya, İstanbul ve Erzurum'da yer aldığı kabul edilmiştir. Farklı iklim bölgelerine yönelik konut binasının mevcut çatı ve cephe alanlarında optimum verimde çalışabilecek PV sistemler tasarlanmıştır. Bu iki PV sistem için gerçekleştirilen yaşam döngüsü analizleri çerçevesinde PV sistemlerin üretim ve kullanım evrelerine ilişkin enerji analizleri yapılmıştır. Enerji analizleri sonucunda PV sistemlerin enerji performansları, enerji geri

ödeme süresi, enerji getirisi faktörü ve CO_2 salımı azaltım potansiyeli açısından değerlendirilmiştir.

2. YÖNTEM

2.1. Bina Modeli

Bu çalışmada, TOKI tarafından "kaynak geliştirme uygulaması" adı altında 2008 yılında İstanbul'da yapımı tamamlanmış bir toplu konut projesi ele alınmıştır. Şekil 1'de genel görünümü verilen toplu konut projesinden bir blok referans bina olarak çalışma çerçevesinde irdelenmiştir.



(a) (b)

Şekil 1: Toplu konut projesinin uydu görüntüsü (a) ve genel görünümü(b)

Çalışma kapsamında ele alınan referans bina, 17 katlı bir yapı olup kat yüksekliği 2.79 m'dir. Çatı tipi yürünebilir teras çatıdır. Biçim faktörü (plandaki bina uzunluğu/bina derinliği) 1.37, A/V oranı (toplam dış yüzey alanı / bina hacmi) 0.19, taban alanı 573 m^2 ve toplam bina yüksekliği ise 48.28 m'dir. Saydamlık oranları (toplam saydam alan/toplam cephe alanı), kuzey, güney, doğu ve batı cepheleri için sırası ile %14, %15, %24 ve %30'dur.

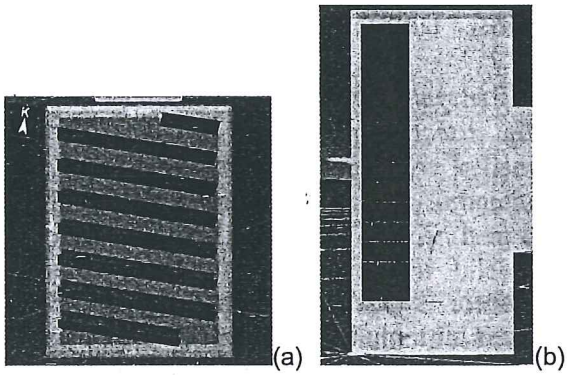
2.2. PV Sistem Tanımı

Referans binanın teras çatı ve güney cephesi opak alanlarında şebekeye bağlı olduğu varsayılan PV sistemler tasarlanmıştır.

Teras çatı alanında tasarlanan PV sistemler için yüksek verimde çalışabilen kristal silisyum PV hücrelerinden tek kristalli silikon PV hücreler kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ele alınan iklim bölgelerini temsil eden iller için teras çatı alanında kurulacak PV sisteme ilişkin optimum panel eğim açılarının belirlenmesi amacıyla analiz çalışmaları yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, PV paneller için belirlenmiş optimum eğim açıları Antalya için 32°, İstanbul için 31° ve Erzurum için ise 30°'dir. PV paneller güneye yönlendirilmiş ve panel dizilerinde gölgelenmeden kaynaklı kazanç kaybını %1'e indirecek mesafe aralıkları, panel dizileri arasındaki uygun gölgeleme mesafeleri olarak dikkate alınmıştır (**Şekil 2a**).

Güney cephesi opak alanlarında ise, verimin güneş ışınım yoğunluğuna bağımlılığının daha az olduğu ince film PV hücrelerinden şekilsiz (amorf) silikon PV hücreler kullanılmıştır. PV paneller, mevcut binanın güney cephesi opak alanına güneyden doğuya 9° sapma açısı (yüzey azimut açısı) ve 90° eğim açısı ile yerleştirilmiştir (**Şekil 2b).**

Çatı ve cephe alanında kullanılan PV modüllere ilişkin veriler, Çizelge 1'de belirtilmiştir.



Şekil 2: Teras çatı (a) ve güney cephesi opak(b) alanlarında tanımlı PV panellerin yerleşimi

Çizelge 1: Tanımlanan PV modüllere ilişkin veriler

Teknoloji	Uygulama Alanı	Güç (Wp)	Modül Verimi (%)	Uzunluk/Genişlik (mm)	Çerçeve
Tek kristalli silikon	çatı	190	14.9	1581/809	Aluminyum
Şekilsiz(amorf) silikon	cephe	340	5.9	2600/2200	-

2.3. Yaşam Döngüsü Enerji Analizi

PV sistemler için gerçekleştirilecek yaşam döngüsü enerji analizi, enerji girdisi ve enerji çıktısı kapsamında ele alınmıştır.

Enerji girdisi (E_{in}): PV sistem yaşam döngüsü süresince ihtiyaç duyulan toplam enerji miktarıdır. Ancak, PV sistemin üretimi için harcanan enerji miktarı (gömülü enerji), PV sistem yaşam döngüsü sürecindeki diğer evreler için ihtiyaç duyulan enerji miktarına kıyasla çok yüksektir. Genellikle çalışmalarda [4 -7] enerji girdisi (E_{in}) olarak PV sistemlerin gömülü enerji değerleri ele alınmakta olup bu çalışmada da PV sistemlere ilişkin gömülü enerji değerleri, diğer bir deyişle PV modüllerin üretimi (E_{PV}) ve diğer sistem bileşenlerinin üretimi (E_{BOS}) evresinde harcanan enerji miktarları dikkate alınmıştır. Diğer sistem bileşenleri kapsamında PV panelleri destekleyici alt strüktür, çevirici (invertör) ve kablolama ele alınmıştır. Gerekli olan enerji girdisi aşağıda belirtilen eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır [8]:

$$E_{in} = E_{PV} + E_{BOS} \quad (1)$$

Bu çalışmada PV modül ve diğer sistem bileşenlerine ilişkin enerji girdilerinin hesaplanmasında üretim evresinde harcanan toplam birincil enerjiyi ifade eden brüt enerji gereksinimleri dikkate alınmıştır. PV sisteme ilişkin brüt enerji gereksinimleri ve yaşam ömürleri, Çizelge 2'de belirtilmiştir.

Enerji çıktısı (E_{out}): PV sistemin yıllık ürettiği enerji miktarıdır. PV sistem ile üretilen enerji miktarı, güneş ışınımı, PV modül ve diğer sistem bileşenlerinin verimi gibi pek çok parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. PV sistem tasarımının doğru bir şekilde yapılabilmesi amacıyla PV sistemlerin tasarımına ve simülasyonlarına ilişkin geliştirilmiş araçlar

kullanılmalıdır. Bu çalışmada, üç boyutlu modelleme ve detaylı gölgeleme analizlerinin yapılabildiği dinamik simulasyon programı PV*SOL Expert 6.0 kullanılmıştır [12]. Tüm PV sistem bileşenleri (panel, çevirici vb.), üreticiler tarafından yayınlanmış performans verilerine dayalı elektriksel eşdeğerleri dikkate alınarak tanımlanmıştır.

Çizelge 2: PV modül ve diğer sistem bileşenlerine ilişkin brüt enerji gereksinimleri ve yaşam ömürleri [8-11]

Bileşen	Brüt enerji gereksinimi	Yaşam ömrü (yıl)
Tek kristalli silikon modül	3700 MJ/m² [9]	30 [11]
Şekilsiz (amorf) silikon modül	1889 MJ/m² [10]	30 [11]
Destekleyici strüktür+kablolama	100 MJ/m² [8]	30 [11]
Çevirici (invertör)	1930 MJ/kWp [8]	15 [11]

PV sistem ile üretilen enerji miktarının hesaplanmasında, eğimli PV panel yüzeyi üzerine düşen güneş ışınımı değerinin belirlenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada, PV*SOL Expert programı aracılığı ile ele alınan illere ilişkin Meteonorm 7.0 veritabanından[13] elde dilen yatay düzlem ışınım verileri simülasyon süresince eğimli yüzey için dönüştürülmüş ve toplam aktif PV yüzey alanı ile çarpılarak PV sistemin üretebileceği enerji miktarı hesaplanmıştır. Bu çalışma için tanımlanan her iki PV sisteme ilişkin performans verileri, Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3: Tanımlanan PV sistemlere ilişkin performans verileri

İl	Teras Çatı PV sistemleri			Güney cephesi PV sistemleri		
	PV kurulu gücü (PV_{out}) (kWp)	PV yüzey alanı (m²)	Performans oranı (%)	PV kurulu gücü (PV_{out})(kWp)	PV yüzey alanı (m²)	Performans oranı (%)
Antalya	29.83	201.06	84.10	14.28	258.19	84.50
İstanbul	29.26	197.22	85.20	14.28	258.19	84.30
Erzurum	29.64	199.78	85.00	14.28	258.19	84.70

Çalışma kapsamında, PV sistemin yaşam ömrü 30 yıl olarak dikkate alınmıştır [11]. Tanımlanan bu yaşam ömrü içerisinde PV modüllerin performansında oluşabilecek yıllık azalma (degradasyon) değerleri ilk on yıl boyunca %1, geri kalan yıllar için ise %0.5 olarak alınmıştır [14].

2.4. Enerji Performans Göstergelerinin Hesaplanması

Bu çalışmada, PV sistemlerin enerji performansı, enerji göstergeleri ve çevresel göstergeler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Enerji göstergeleri olarak enerji geri ödeme süresi ve enerji getirisi faktörü, çevresel gösterge olarak ise CO_2 salımı azaltım potansiyeli kullanılmıştır.

Enerji geri ödeme süresi (Energy payback time (EPBT)): PV sistem yaşam döngüsü süresince harcanan toplam enerji mikatrının (E_{in}) kullanım evresi boyunca üretilen yıllık enerji miktarına (E_{out}) oranıdır ve yıl olarak ifade edilir [15, 4]. EPBT, aşağıda belirtilen eşitlik yardımı ile hesaplanır [9]:

$$EPBT = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (2)$$

Enerji getirisi faktörü (Energy return factor (ERF)): PV sistem kullanım evresi süresince üretilen enerji miktarının (E_{out}) yaşam döngüsü boyunca harcanan toplam enerji miktarına (E_{in}) oranıdır ve birimsizdir [**15, 4**]. ERF, aşağıda belirtilen eşitlik yardımı ile hesaplanır [**9**]:

$$ERF = \frac{E_{out} \times N}{E_{in}} = \frac{N}{EPBT} \quad (3)$$

N : PV sistem yaşam ömrü

Bu çalışmada, EPBT ve ERF göstergeleri ile PV sistemin üretim evresinde harcanan enerji ile kullanım evresinde üretilen enerji miktarı arasındaki denge ifade edilmektedir. PV sistemin kullanım evresinde üretilen yıllık enerji miktarı ile üretim evresinde gereksinim duyulan enerjinin kıyaslanabilmesi amacıyla her iki enerji türünün birincil enerji ya da nihai enerji cinsinden belirtilmesi gerekmektedir. Enerji değerlerinin aynı enerji cinsinden ifade edilebilmesi için şebeke verimlilik değeri kullanılmalıdır. Türkiye için hesaplanmış bir şebeke verimlilik değerine ulaşılamaması nedeni ile Kıta Avrupası elektrik şebekesi için belirlenmiş şebeke verimlilik değeri(%31) dikkate alınmıştır [**16, 4**].

CO_2 salımı azaltım potansiyeli: PV sistem kullanımı ile önlenebilen seragazı salım miktarıdır. Birimi ise kurulu PV güç başına ton CO_2 salımıdır (tCO_2/kWp). CO_2 salımı azaltım potansiyeli, aşağıda belirtilen eşitlik yardımı ile hesaplanır [**9**]:

$$P_{CO2} = \frac{E_{out} \times \mu_{out} \times N}{PV_{out}} \quad (4)$$

P_{CO2} :CO_2 salımı azaltım potansiyeli (tCO_2/kWp)
E_{out} : PV sistem tarafından üretilen enerji (kWh)
μ_{out} : PV sistem tarafından üretilen enerji ile önlenilen CO_2 salım faktörü (tCO_2/kWh)
PV_{out} : PV sistem kurulu gücü (kWp)

Yukarıdaki eşitlikte belirtilen μ_{out}'a ilişkin değer, Entegre Sistemler için Küresel Emisyon Modeli (Global Emission Model for Integrated Systems(GEMIS)) veritabanından alınmıştır [**17**]. Çalışma kapsamında farklı iklim bölgelerinin temsili illerinde kurulu olduğu varsayılan her iki PV sisteme ilişkin hesaplanmış enerji geri ödeme süresi, enerji getirisi faktörü ve CO_2 salımı azaltım potansiyel değerleri, Çizelge 4 ve 5'te belirtilmiştir.

Çizelge 4: Teras çatı PV sistemlerine ilişkin hesaplanmış enerji ve çevresel gösterge değerleri

İl	E_{in} (kWh)	E_{out} (kWh/y)	EPBT (yıl)	ERF	P_{CO2} (tCO_2/kWp)
Antalya	244,214	51,009	4.8	18.0	40.5
İstanbul	239,550	46,377	5.2	16.7	37.5
Erzurum	242,660	42,859	5.7	15.2	34.2

Çizelge 5: Güney cephesi PV sistemlerine ilişkin hesaplanmış enerji ve çevresel gösterge değerleri

İl	E_{in} (kWh)	E_{out} (kWh/y)	EPBT (yıl)	ERF	P_{CO2} (tCO_2/kWp)
Antalya	157,961	15,351	10.3	8.4	25.4
İstanbul	157,961	13,989	11.3	7.6	23.2
Erzurum	157,961	12,969	12.2	7.1	21.5

Çizelge 4 ve 5'te görüldüğü üzere, enerji ve çevresel göstergeler açısından cephe alanında şekilsiz (amorf) silikon paneller ile oluşturulan PV sisteme kıyasla, çatı alanında tek kristalli silikon paneller kullanılarak kurulan PV sistem ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çatı alanında kurulu PV sistemin üretim evresi enerji girdisinin, cephe alanında kurulu PV sisteme kıyasla yaklaşık 1.5 kat daha fazla olmasına rağmen yıllık enerji çıktısının yüksek düzeyde olması nedeni ile enerji performans göstergeleri açısından teras çatı alanında kurulu PV sistem ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Antalya, İstanbul ve Erzurum'da kurulu olduğu varsayılan PV sistemler için gerçekleştirilen yaşam döngüsü enerji analizleri sonucunda, her iki PV sistemin üretim evresinde harcanan enerjiyi (E_{in}) 30 yıl olarak dikkate alınan sistem ömrü içerisinde geri ödeyebildiği belirlenmiştir. Çatı alanında kurulu PV sisteme ilişkin enerji geri ödeme süresi Antalya için 4.8 yıl, İstanbul için 5.2 yıl, Erzurum için ise 5.7 yıldır. Cephe alanında kurulu PV sistem için ise, en düşük enerji geri ödeme süresi Antalya'da 10.3 yıl, en yüksek enerji geri ödeme süresi ise Erzurum'da 12.2 yıl olarak hesaplanmıştır. Enerji getirisi faktörü açısından PV sistemlerin performansları değerlendirildiğinde, çatı alanında kurulu PV sistemler ile bu sistemlerin üretimi için harcanan enerjinin Antalya'da, İstanbul'da ve Erzurum'da sırasıyla 18.0, 16.7 ve 15.2 kat daha fazlasının 30 yıllık kullanım evresi süresince üretilebildiği belirlenmiştir. Cephe alanında kurulu PV sistemlere ilişkin ise, Antalya'da, İstanbul'da ve Erzurum'da 30 yıllık kullanım süresince üretilen enerji, bu sistemlerin üretimi için harcanan enerjinin sırasıyla 8.4, 7.6 ve 7.1 kat daha fazlasıdır. Ele alınan iller kapsamında, PV sistemlerden üretilen enerji ile çatı alanında kWp başına 40.5- 34.2 tCO_2, cephe alanında ise kWp başına 25.4-21.5 tCO_2 arasında değişim gösteren CO_2 salımı azaltım potansiyeli hesaplanmıştır.

3. SONUÇLAR

Binalarda enerji tüketimine bağlı çevresel etkilerin çok yüksek boyutlara ulaşması nedeni ile sürdürülebilir enerji kullanımına katkı sağlayabilecek yenilenebilir enerji teknolojilerine ilişkin performans değerlendirmeleri, tasarım aşamasında büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin coğrafik konumundan ötürü sahip olduğu yüksek güneş enerjisi potansiyeli göz önünde bulundurularak PV teknolojisi kullanımına ilişkin çevresel potansiyel değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, farklı güneşlenme süresi ve güneş ışınımı verilerinin mevcut olduğu sıcak nemli, ılımlı nemli ve soğuk iklim bölgelerinin temsili illeri sırasıyla Antalya, İstanbul ve Erzurum'da yer aldığı varsayılan bir konut binasının çatı ve cephe alanlarında kurulu PV sistemler için yaşam döngüsü enerji analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, ele alınan tüm iller için her iki PV sistemin kullanım evresi süresince üretim evresinde gereksinim duyulan enerjiden daha fazlasını üretebildiği belirlenmiştir. Ayrıca, kWp başına cephede 25 tCO_2'e, çatı alanında ise 40.5 tCO_2'e kadar CO_2 salım azaltımı potansiyelinin mevcut olduğu hesaplanmıştır. Dolayısıyla, PV sistemlerin enerji potansiyelinin ve buna paralel çevresel potansiyelinin çalışma kapsamında ele alınan iklim bölgeleri için yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu kapsamda Türkiye, enerji ve çevre alanında izlediği politikaların sürdürülebilirliğini sağlamak, düşük karbon ekonomisi hedefine ulaşmak ve artan enerji talebini karşılamada dışa

bağımlılık oranını azaltmak amacıyla yüksek güneş enerjisi potansiyelini çok iyi kullanmalıdır. PV sistem kurulumunda lider pek çok Avrupa ülkesinden daha yüksek güneş enerjisi potansiyele sahip olmasına rağmen Türkiye'de PV sistem kurulumu çok yavaş ilerlemektedir. Bu nedenle, PV sistemlerin kurulumunda süregelen engellerin aşılması amacıyla öncelikli olarak konu ile ilişkili yasal düzenlemelerin, ulusal eylem planlarının ve teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi gereklidir. Ayrıca, PV sistemlerin binalara entegre edilmesini ve binaların enerji üreten sistem bileşenlerine dönüştürülmesini dikkate alan bütüncül yaklaşımların kapsamlı olarak değerlendirilmesi ile enerji tüketimine bağlı çevresel etkilerin minimize edilmesi, enerji maliyetlerinin azalması ve böylelikle ülke ekonomisine önemli bir katkı sağlanması da mümkündür.

KAYNAKLAR

1. Q., Wang, H.N., Qiu, "Situation and outlook of solar energy utilization in Tibet, China," *Renewable and Sustainable Energy Reviews.***13**, (2009), pp: 2181–2186.

2. A.F., Sherwani, J.A., Usmani and Varun, "Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews.***14**, (2010), pp: 540–544.

3. European Photovoltaic Industry Association (EPIA), "Global market outlook for photovoltaics 2013-2017".

4. International Energy Agency (IEA), "Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities," Photovoltaic power systems programme, Report IEA-PVPS-T10-02:2006, (2006).

5. E.A., Alsema, "Energy payback time and CO2 emissions of PV systems" Chap. IV-2 in *Practical Handbook of Photovoltaics,* (2012).

6. I., Nawaz, G.N., Tiwari, "Embodied energy analysis of photovoltaic (PV) system based on macro and micro level," *Energy Policy.* **34**, (2006), pp:3144-3152.

7. R., Sharma, G.N., Tiwari, "Life cycle assessment of stand alone photovoltaic (SAPV) system under on field conditions of New Delhi, India," *Energy Policy.* **63**, (2013), pp:272-282.

8. E.A., Alsema, M.J., de Wild-Scholten, "Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production," *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering,* Leuven, (2006).

9. E.A., Alsema, M.J., de Wild-Scholten, "Reduction of the environmental impacts in crystalline silicon module manufacturing," *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference,* Milan, (2007).

10. E., Alsema, "Energy requirements of thin-film solar cell modules-a review," *Renewable and Sustainable energy reviews.***2**, (1998), pp:387-415.

11. International Energy Agency (IEA), "Methodology guidelines on life cycle assessment of photovoltaic electricity," Photovoltaic power systems programme, Report IEA-PVPS-T12-01:2009, (2009).

12. PV*SOL Expert software, "User manual of PV*SOL Expert 6.0," < http://www.valentin-software.com/en/products/photovoltaics/12/pvsol-expert >.

13. Meteonorm software, "User manual of Meteonorm 7.0," < http://meteonorm.com/products/meteonorm-software/>.

14. J., Coello, "Degradation of crystalline silicon modules: a case study on 785 samples after two years under operation," *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition,* Hamburg, Germany, (2011).

15. E.A., Alsema, E., Nieuwlaar, "Energy viability of photovoltaic systems," *Energy Policy.***28**,(2000), pp:999-1010.

16. E.A., Alsema, M.J., de Wild-Scholten, "The real environmental impacts of crystalline silicon PV modules : an analysis based on up-to-date manufacturers data," *20th European PV Solar Conference*, Barcelona, (2005).

17. Global Emission Model for Integrated Systems (GEMIS). < http://www.iinas.org/gemis-de.html>