



Investigation of azimuth and tilt angle effects on building integrated photovoltaic systems

Erdal Yıldırım^{1*}, Mehmet Azmi Aktacı²

¹Vocational School of Technical Sciences, Harran University, Şanlıurfa, 63200, Turkey

²Department of Mechanical Engineering, Harran University, Şanlıurfa, 63300, Turkey

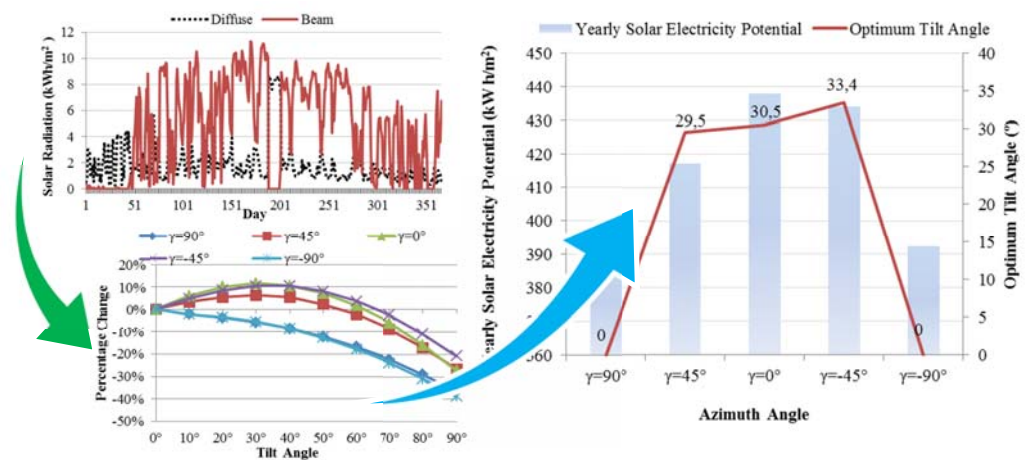
Highlights:

- Optimum tilts for the east, west, southeast, and southwest facing PV panels
- Energy obtained at the monthly, seasonal and yearly optimum tilt angles
- Comparing the energy obtained at optimum tilts to that obtained on horizontal

Keywords:

- Optimum tilt angles
- Solar radiation
- Building integrated photovoltaic panels

Graphical/Tabular Abstract



Purpose: In order to determine the maximum potential of PV electricity generation of building integrated photovoltaic applications, the ratio of a percentage change of the annual amount of solar radiation on tilted surface to the annual amount of solar radiation on horizontal surface was found. At the obtained optimum tilt angles, the annual electricity generated by PV panels was calculated according to given directions.

Article Info:

Received: 06.02.2017

Accepted: 31.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416413

Theory and Methods: In this study, total solar horizontal radiation values are obtained from meteorological data measured at Harran University, Şanlıurfa, Turkey. The average of ten-minute measured data is assumed to be constant over that one hour period. A total solar radiation value on the tilted surface is calculated by the isotropic diffuse model.

Results: The maximum electric energy is generated on south oriented PV panels with optimum tilt angle $\phi=7^\circ$. The electric energy generated at the optimum slopes on southeast and southwest surfaces was about 1 % and 4 % less than those generated from south facing surfaces, respectively. For east and west directions, the annual optimum tilt angle is equal to 0° . The annual energy gain of panels directed to south at optimum tilt is 11,5 % compared to the horizontal surface.

Correspondence:

Author: Erdal Yıldırım

e-mail:

erdaly@harran.edu.tr

phone: +90 414 318 3000

Conclusion: At optimum azimuth angle $\gamma=0^\circ$, the optimum slope for the tilted surfaces was found between $\phi=20^\circ$ and ϕ with an error 1,5 %. For vertical surfaces, the maximum energy within the given azimuth angles is obtained at $\gamma=-45^\circ$ and is 20,6 % less than the horizontal surface's.



Binaya entegre fotovoltaik sistemlerde azimut ve eğim açısı etkilerinin incelenmesi

Erdal Yıldırım^{1*}, Mehmet Azmi Aktacir²

¹Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Şanlıurfa, 63200, Türkiye

²Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Şanlıurfa, 63300, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Doğu, batı, güneydoğu, güneybatı ve güney yönlü PV paneller için optimum eğimler
- Aylık, yıllık ve mevsimlik sabit optimum eğimlerde elde edilen enerji
- Optimum eğimlerde elde edilen enerjinin yatayda elde edilenle karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Geliş: 06.02.2017

Kabul: 31.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416413

Anahtar Kelimeler:

Optimum eğim,
güneş ışınımı,
binaya entegre fotovoltaik
paneller

ÖZET

Bina enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji sistemlerinden birisi de fotovoltaik panellerdir. Bina çatısına ve yüzeylerine yerleştirilmiş panellerin potansiyelinin belirlenmesinde eğim ve yönün bilinmesi gereklidir. Bu çalışmada Şanlıurfa (37,1° K ve 38,9° D) için doğu, güneydoğu, batı, güneybatı ve güneye yönlendirilmiş PV panellerin optimum eğimleri yıllık ve aylık olarak belirlenmiştir. Optimum eğimlerde elde edilebilecek elektrik enerjisi hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda, binaya entegre PV sistem tasarımlarında kullanılmak amacıyla pratik sonuçlar sunulmuştur. Eğik yüzeyler için optimum azimut açısı $\gamma=0^\circ$ 'de (güney) optimum eğimin % 1,5 hata oranıyla $\varphi=20^\circ$ ile φ arasında olduğu belirlenmiştir. Dikey yüzeyler için incelenen azimut açıları arasında maksimum enerji $\gamma=-45^\circ$ 'de (güneydoğu) elde edilmiştir ve yatay yüzeye göre % 20,6 daha azdır.

Investigation of azimuth and tilt angle effects on building integrated photovoltaic systems

H I G H L I G H T S

- Optimum tilts for the east, west, southeast, and southwest facing PV panels
- Energy obtained at the monthly, seasonal and yearly optimum tilt angles
- Comparing the energy obtained at optimum tilts to that obtained on horizontal

Article Info

Received: 06.02.2017

Accepted: 31.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416413

Keywords:

Optimum tilt angles,
solar radiation,
building integrated
photovoltaic panels

ABSTRACT

One of the most commonly used renewable energy systems to meet the building energy needs is photovoltaic panel. The slope and orientation must be known to determine the potential of the PV panels placed on the building roof and surfaces. In this study, the optimum slopes of PV panels oriented east, southeast, west, southwest and south were determined monthly and yearly for Şanlıurfa (37,1° N and 38,9° E). Electricity that can be obtained at optimum slopes was calculated. With this work, practical results are presented for use in PV system designs integrated into building. At optimum azimuth angle $\gamma=0^\circ$, the optimum slope for the tilted surfaces was determined between $\varphi=20^\circ$ and φ with an error 1,5 %. For vertical surfaces, the maximum energy at given azimuth angles is obtained at $\gamma=-45^\circ$ and is 20,6 % less than the horizontal surface's.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: erdaly@harran.edu.tr, aktacir@harran.edu.tr / Tel: +90 414 318 3000

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde binalarda tüketilen enerjiyi karşılamak amacıyla çeşitli yenilenebilir enerji sistemlerinden faydalanılmaktadır. Bu kapsamda güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üreten fotovoltaik (PV) panellerin binanın dış yüzeylerine entegre edilerek kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Binaya entegre fotovoltaik sistem (BIPV) olarak adlandırılan bu uygulamalarda, maksimum enerji üretimi için bina cephe ve çatısına konumlandırılan PV panellerin yönlerinin ve eğimlerinin bilinmesi gereklidir. PV panellerin eğim açısı ve konumu elektrik enerjisi üretimini doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir. Genellikle bu konudaki çalışmalarda, güneşe yönlendirilmiş yüzeyler için optimum eğimler tespit edilmiştir. Bu konuda ilk çalışmalardan birisi olan [1]'de yıllık olarak maksimum enerjinin elde edilmesi için panel yüzey eğiminin enlem açısına (φ) eşit ve güneşe yönlendirilmesi önerilmektedir. Şanlıurfa için [2]'de güneşe yönlendirilmiş panellerin optimum eğim açısını belirlemek amacıyla panel eğiminin etkileri araştırılmıştır. Panellerin aylık optimum eğim açılarındaki performansı ile mevsimlik ve yıllık optimum eğim açılarındaki performansı karşılaştırılmıştır. Aylık optimum açılardaki güneş ışınımı kazancı mevsimsel ve yıllık optimuma (yerel enlem açısı) göre sırasıyla % 1,1 ve % 3,9 fazla bulunmuştur. İzmir için [3]'de güney yönlü kolektörlerin optimum aylık, mevsimlik ve yıllık eğimleri hesaplanmıştır. Optimum eğim yaz ayları için ($\varphi-34^\circ$), kış ayları için ($\varphi+19^\circ$) olarak bulunurken yıllık eğim ise $30,3^\circ$ bulunmuştur. Yine İzmir'e ($38,46^\circ$ K) [4] ait deneysel veriler kullanılarak, bina uygulamaları için güneşe yönlendirilmiş güneş kolektörlerinin optimum eğim açısı belirlenmiştir. İzmir'e yakın enleme sahip İsfahan (32° K), İran için [5] aylık ve yıllık optimum eğim açıları literatürdeki farklı hesaplama yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Yıllık optimum eğim açısı $28,84^\circ$ bulunmuştur. Benzer bir diğer çalışmada [6] ise Erzurum'da ($39,55^\circ$ K) güneşe yönlendirilmiş kolektörler için optimum aylık eğimin belirlenmesi için genel bir bağıntı elde edilmesi amaçlanmıştır. Yıllık optimum eğim ise $34,3^\circ$ bulunmuştur. Güney yarım küreye ait bir çalışmada ise [7] Malezya'daki beş bölge için PV panellerin aylık ve mevsimlik optimum eğimleri belirlenmiştir. Aylık optimum eğim açılarının uygulanmasıyla PV panellerde % 6,13 verim artışı sağlanırken mevsimlik optimum eğimlerin uygulanmasında bu verim artışı % 5,85 olarak bulunmuştur.

PV panel yüzeyine düşen ışınımı etkileyen parametrelerden bir diğeri ise azimut açısıdır. Azimut açısı PV panellerin güneşe olan yönelmesini ifade eder. Güneşe yönlendirilmiş panellerde azimut açısı 0° , doğu için -90° ve batı için 90° 'dir. Optimum panel eğiminin belirlenmesiyle ilgili yapılmış çalışmalar içerisinde bir grup ise bu parametreyi de hesaba katmıştır. [8]'de BIPV uygulamaları için aylık, yıllık ve mevsimlik optimum eğim ve azimut açılarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Hong Kong için optimum yıllık eğim 20° bulunmuştur. Bu değer yerel enlem açısından ($22,2^\circ$ K) biraz daha azdır. İzmir iline ait bir başka çalışmada [9] ise güneş

ışınım değerlerinin farklı eğim açılarındaki yüzey azimut açısı değişimine göre gösterdiği davranış incelenmiştir. Belirli aylarda belirli aralıklardaki yüzey eğim açıları (β) için optimum azimut açıları (γ) verilmiştir. [10]'da ise $-90^\circ < \gamma < 90^\circ$ aralığındaki yönler için $-20^\circ < \beta < 90^\circ$ aralığındaki eğimli yüzeylere düşen güneş ışınımı miktarı hesaplanmıştır. Yerel enlem açısı Abu Dabi'de $22,4^\circ$ K iken optimum eğim 22° olarak bulunmuştur. Hesaplamalar neticesinde eğim açısının yılda iki defa (güney yönünde, Nisan başında $\beta=2^\circ$ ve Ekim başında ise $\beta=42^\circ$) değiştirilmesi önerilmiştir. Çalışma [11]'de ise Güney Afrika için ölçülmüş veriler kullanılarak solar kolektörlerin optimum eğim ve azimut açısı hesaplanmıştır. Sonuçlar yatay yüzeye sabitlenmiş kolektörlere göre güneş takip sistemli kolektörlerin ortalama % 45 daha fazla yıllık ışınım aldığını göstermiştir. Optimum eğimde sabitlenmiş kolektörlerin ise yataya sabitlenmiş kolektörlere göre % 10 daha fazla ışınım aldığı sonucu bulunmuştur.

Literatürden de anlaşılacağı gibi yerel ışınım verileri kullanılarak yapılan çalışmaların büyük bir kısmında sadece güney yönlü optimum eğimler araştırılmıştır. Binaya entegre PV sistemlerinde güney cephe alanlara ek olarak diğer cepheler de kullanılabilir. Özellikle güney cephenin yetersiz kaldığı uygulamalarda, doğu ve batı cepheleri uygulama alanı olarak tercih edilebilmektedir. Bu çalışmada BIPV uygulamalarında maksimum potansiyeli belirlemek amacıyla güney cephesinin yanı sıra, doğu, batı, güneydoğu ve güneybatı olmak üzere beş farklı cephe dikkate alınmıştır. Çalışmanın ilk adımında, binanın cephelerini temsil eden beş farklı azimut değeri için aylık optimum eğim açıları ve yüzeye düşen ışınım değerleri belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci adımında, elde edilen optimum eğim açılarındaki incelen tüm yönler için PV paneller ile yıllık elektrik üretim değerleri hesaplanmıştır. Son adımında ise, değişen azimut açısıyla optimum eğimdeki yüzeylerin yatay yüzeye düşen ışınım değerlerinden sapması boyutsuz olarak ifade edilmiştir. Ayrıca 0° ile 90° eğim açıları arasında elde edilen direkt, difüz ve yerden yansıyan güneş ışınımı elemanları yatay yüzeye düşen ışınım ile karşılaştırılarak yüzdesel değişimi gösterilmiştir.

2. TEORİK METOT (THEORETICAL METHOD)

Güneş ışınım verileri yerel optimum güneş ışınım potansiyelinin hesaplanmasında en önemli parametredir. Bu çalışmada Şanlıurfa meteorolojik koşulları dikkate alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan güneş ışınım değerleri, Harran Üniversitesi Osmanbey yerleşkesinde (Şanlıurfa yerel enlem açısı $37,1^\circ$ K) kurulu olan ölçüm sisteminden elde edilmiştir. Direkt güneş ışınım ölçümünde Kipp & Zonen 2AP Güneş takip sistemine monte edilmiş CH-1 model, $9,76 \times 10^{-6}$ V/Wm⁻² hassasiyetinde pirheliyometre ve difüz ışınım ölçümünde ise CMP11 model, $8,89 \times 10^{-6}$ V/Wm⁻² hassasiyetinde prinometre kullanılmıştır [12]. Veriler 2012 yılına aittir ve 10'ar dakika aralıklarla yatay yüzeye düşen direkt ve difüz ışınım değerlerini içermektedir. Bir saatlik zaman aralığında

ölçülen verilerin ortalaması alınmış ve saat boyunca yüzeyin bu ortalama değerinde sabit güneş ışınımı (kWh/m^2) aldığı kabul edilmiştir. Analizde kullanılan güneş ışınım değerlerinin günlük ortalamaları ve yıl boyunca değişimi Şekil 1’de gösterilmektedir.

Eğik yüzeye düşen toplam güneş ışınımı değerlerinin hesaplanması için [1]’de verilen izotropik difüz model kullanılmıştır. Bu metotla eğik yüzeye düşen toplam güneş ışınımı Eş. 1’deki gibi hesaplanır;

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_p \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

Eş. 1’in sağ tarafındaki ifadeler sırasıyla toplam güneş ışınımının direkt, difüz ve yerden yansıyan elemanlarıdır. I_b ve I_d değerleri yatay yüzeye düşen toplam direkt ve difüz ışınımını gösterir. Eşitlik 1’de verilen β ise yüzey eğim açısıdır. Geometrik faktör, R_b her hangi bir zamanda eğik yüzeydeki direkt ışınımın yatay yüzeydeki ışınımına oranıdır ve Eş. 2’deki gibi hesaplanır [1],

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2)$$

Işınımın yüzeye geliş açısı θ ise yüzeye gelen direkt ışınım ile yüzeyin normali arasındaki açıdır. Işınımın yüzeye geliş açısıyla diğer açılar arasındaki ilişki Eş. 3’deki gibi ifade edilir [1],

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\beta) - \\ & \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\omega) \end{aligned} \quad (3)$$

Yatay yüzeyler için geliş açısı zenit açısına (θ_z) eşittir. Bu durumda eğim açısı $\beta=0$ olur ve Eş. 3 aşağıda verilen Eş. 4’deki ifadeye dönüşür [1],

$$\cos(\theta_z) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin \varphi \cdot \sin(\delta) \quad (4)$$

φ yerel enlem açısıdır. ω ise saat açısıdır. Güneşin yerel meridyenin doğusunda veya batısında açısal hareketidir ve her bir saat için 15° dir. Sabah saatlerinde eksi, öğleden sonra ise artı değeri alır. γ azimut açısıdır ve güney yönlü yüzeylerde değeri sıfırdır. δ , deklinasyon açısı ise Eş. 5 kullanılarak hesaplanır,

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (5)$$

Eğik yüzeye düşen aylık toplam güneş ışınımı saatlik ışınımın toplanmasıyla elde edilir ve Eş. 6’da gösterildiği gibi hesaplanır [1],

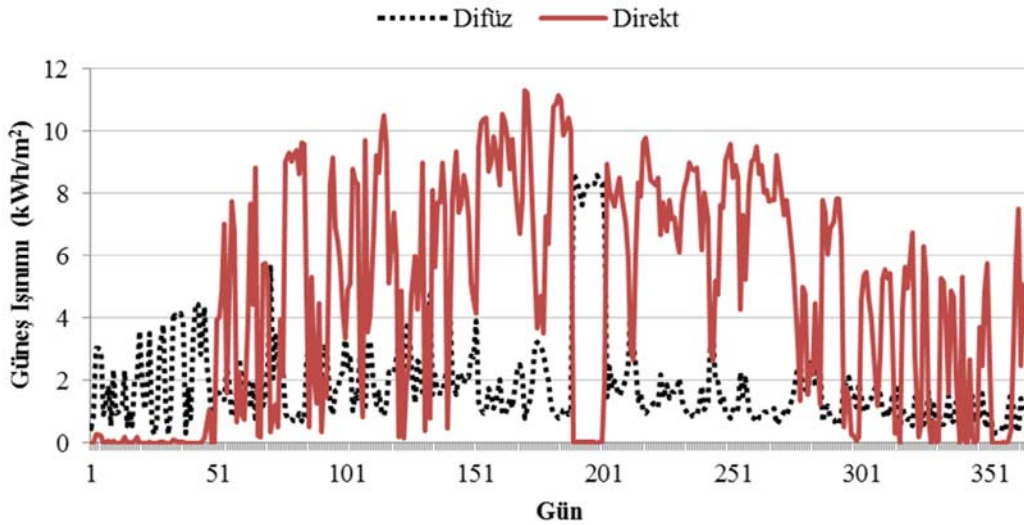
$$H = N_i \sum_1^{24} I_T \quad (6)$$

Burada N_i hesaplanmak istenen ayın gün sayısıdır. Yıllık toplanan güneş ışınımı ise yukarıda verilen eşitliğin 12 ay için elde edilen değerlerin toplamıdır. Bir fotovoltaik sistemin çıktısı olarak üretilen elektriği belirlemek için genel formül Eş. 7’deki gibidir [14],

$$E = A \cdot r \cdot H \cdot Pr \quad (7)$$

Burada A toplam panel alanıdır ve r solar panel verimidir. Pr ise gölgeleme, sıcaklık, tozlanma vb. kayıpları ifade eden performans oranıdır. Hesaplamalar için yaygın kullanılan polikristal PV panel teknolojisi seçilmiştir. Bu teknoloji için yüzeye düşen güneş enerjisinden elektrik enerjisine toplam dönüşüm verimi ise % 16 olarak kabul edilmiştir [15].

Boyutsuz elektrik enerjisi üretimi X_i , optimum eğimde elde edilen aylık toplam elektrik enerjisinin yatay yüzeyde elde edilen elektrik enerjisine oranıdır ve Eş. 8’deki gibi hesaplanır,



Şekil 1. Şanlıurfa için yatay yüzeye düşen 2012 yılına ait direkt ve difüz ışınımın günlük değerleri (Daily values of beam and diffuse radiation on the horizontal surface for Şanlıurfa for the year 2012)

$$X_i = \frac{E_{T,opt}}{E} \quad (8)$$

PV panellerin yataya göre eğim açısıyla birlikte değişen enerji toplama potansiyelleri E_p , yüzdesel olarak Eş. 9'daki gibi ifade edilir

$$E_p = \frac{E_T - E}{E_T} \cdot 100 \quad (9)$$

Gerçekleştirilen analizde değişik eğim açılarındaki ortalama günlük güneş ışınımının hesaplanmasında tipik gün kullanılmıştır. Her ayın ortasında yer alan gün tipik gün olarak kabul edilmiştir. Günlük güneş ışınım değerleri $0^\circ \leq \beta < 90^\circ$ aralığındaki eğimler için hesaplanmıştır. Yüzey eğim açısının değişimi her ay için $\gamma=90^\circ$ (Batı), $\gamma=45^\circ$ (Güneydoğu), $\gamma=0^\circ$ (Güney), $\gamma=-45^\circ$ (Güneybatı) ve $\gamma=-90^\circ$ (Doğu) yüzey azimut açısı değerlerinde bulunmuştur.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

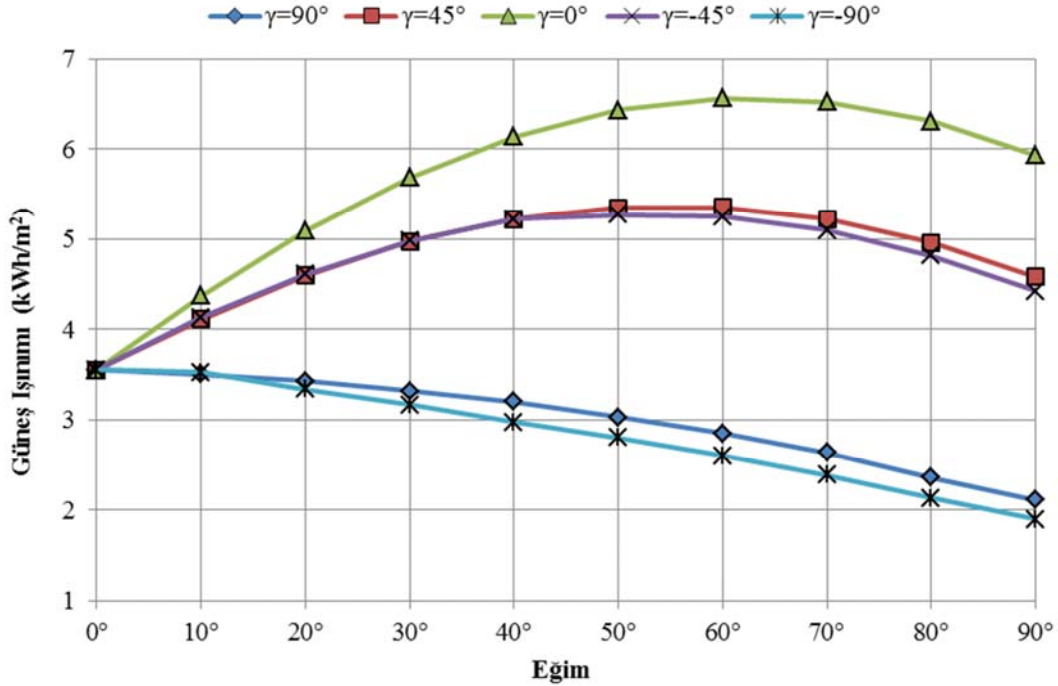
Şanlıurfa meteorolojik koşulları dikkate alınarak yapılan bu çalışmada, sabit azimut açılarında aylara göre yüzey eğim açılarıyla değişen ortalama günlük güneş ışınım değerleri elde edilmiştir. Yaz ve kış aylarını temsilen Ocak ve Temmuz ayları alınarak elde edilen grafikler sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 2'de görüleceği gibi, Ocak ayı için maksimum güneş ışınımı, eğim açısının yaklaşık 60° ve azimut açısının 0° olduğu güney cephesinde elde edilmiştir. Ocak ayında batı ve doğu cephelerinde yüzey eğim açısının artmasıyla günlük güneş ışınımı değerleri

azalmaktadır. Ocak ayında batı ve doğu cephelerinde 10° 'lik eğimden sonraki her 10° 'lik eğim açısındaki artışla birim alanda günlük toplanabilen ortalama güneş ışınımında yaklaşık $0,2 \text{ kW}'lık$ bir düşüş görülmektedir.

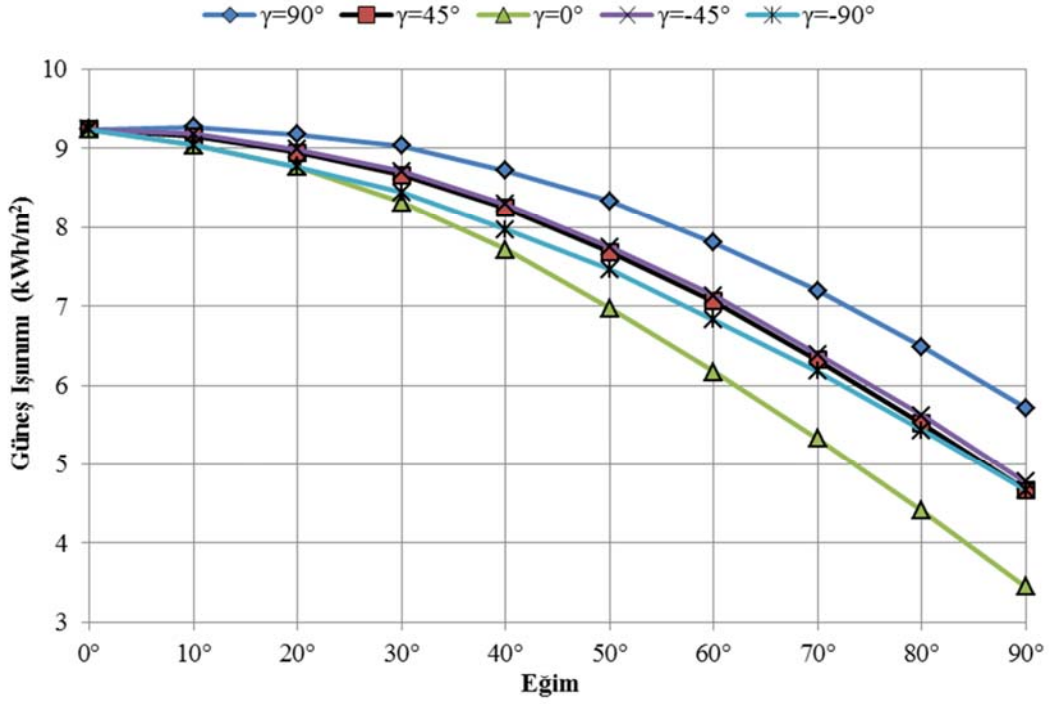
Şekil 3'te görüleceği gibi, Temmuz ayı için maksimum güneş ışınımı, eğim açısının yaklaşık 7° olduğu doğu yönünde elde edilmiştir. Temmuz ayı için farklı azimut açılarında yüzey eğim açısının değişimiyle elde edilen günlük güneş ışınım dağılımı benzer profillerde elde edilmiştir.

Şekil 4'te yılın bütün ayları için güney cephesinde yüzey eğim açısının 0° ile 90° aralığında değişimiyle elde edilen güneş ışınım değerleri gösterilmiştir. Eğim açılarının optimum değerleri aylık eğrilerin fonksiyonlarının türevinin sıfıra eşit olduğu noktadadır. Dolayısıyla aylık maksimum güneş ışınımının toplandığı yüzey eğimi optimum eğim olarak kabul edilmiştir. Şekilde görüleceği gibi yıl boyunca bütün aylara göre maksimum günlük toplanabilen ortalama güneş ışınımı Haziran ve Eylül aylarında yaklaşık 10 kWh/m^2 'dir ve bu ışınımlara karşılık gelen optimum eğimler sırasıyla 0° ve 30° civarındadır.

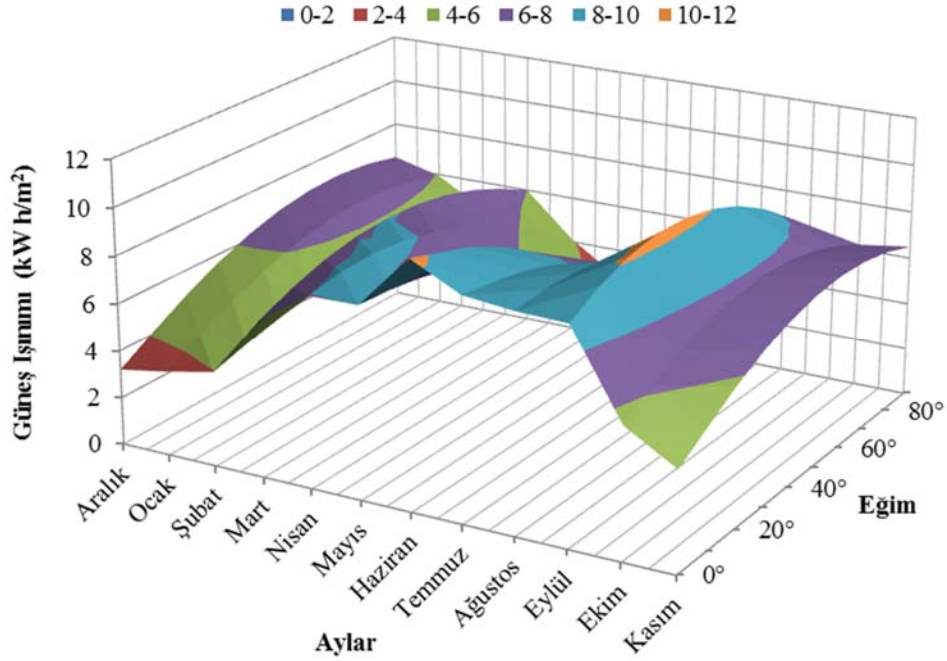
Tablo 1'de $\gamma=90^\circ$, $\gamma=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\gamma=-45^\circ$ ve $\gamma=-90^\circ$ azimut açılarına yönlendirilmiş yüzeyler için optimum eğim açıları belirlenmiş ve aylık optimum yüzey eğimlerinde elde edilecek maksimum güneş ışınımı hesaplanmıştır. En belirgin aylık eğim açılarındaki fark ise kış ayları içindir. Güney yönlü yüzeylerde Aralık ayında maksimum $68,5^\circ$ değerini almıştır. Yüzey eğiminin aylık değiştirilmesiyle toplanabilecek maksimum güneş enerjisi $2963,3$



Şekil 2. Ocak ayı için farklı azimut açılarında yüzey eğim açısının değişimiyle elde edilen günlük güneş ışınımı dağılımı
(Daily solar radiation distribution obtained by varying tilt angle at given azimuth angles for January)



Şekil 3. Temmuz ayı için farklı azimut açılarında yüzey eğim açısının değişimiyle elde edilen günlük güneş ışımasını dağılımı (Daily solar radiation distribution obtained by varying tilt angle at different azimuth angles for July)



Şekil 4. Güneye yönlendirilmiş yüzeylerin her bir ay için ortalama günlük güneş ışıma değerlerinin eğim açısıyla değişimi

(Monthly variation of the average daily solar radiation with the tilt angle for the south facing surfaces)

kWh/m²'dir. Güney yönlü yüzeylerde optimum eğim Ekim-Mart arası ortalama 56,3° bulunurken Nisan-Eylül ayları arası bu değer 9,5°'dir. Belirlenen bu altı aylık periyotlar için

toplanan günlük ortalama güneş ışıması sırasıyla 7 kWh/m² ve 9,2 kWh/m² 'dir. Bu eğimler kullanıldığında yıllık toplanabilen güneş ışıması 2802,2 kWh/m²'dir. Mevsimsel

olarak optimum eğimlere baktığımızda, güney yönlü yüzeyler için optimum eğim ve günlük ışınlam değerleri sırasıyla, kış mevsimi (Aralık, Ocak, Şubat) için 62° ve $6,2 \text{ kWh/m}^2$, ilkbahar (Mart, Nisan, Mayıs) için $19,2^\circ$ ve $8,1 \text{ kWh/m}^2$ yaz (Haziran, Temmuz, Ağustos) için $2,3^\circ$ ve $9,6 \text{ kWh/m}^2$ ve sonbahar (Eylül, Ekim, Kasım) için 48° ve $8,5 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. Yüzey eğim açısının mevsimlik değişimiyle elde edilen toplam güneş ışınlamı $2922,9 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. Bu çalışma sonucunda elde edilen optimum eğimler Nijegorodov vd. [4]'na ait bağıntılar kullanılarak elde edilen optimum eğimlerle karşılaştırılmıştır. Her bir ay için verilen bağıntılardan elde edilen sonuçlarla sunulan bu çalışmadaki sonuçların uyumlu olduğu Tablo 2'den de anlaşılmaktadır

Verilen azimut açılarında eğimli yüzeye bir yıl boyunca düşen ışınlam miktarının yatay yüzeye düşen yıllık ışınlam miktarına oranının yüzdesel ifadesinin yüzey eğimiyle birlikte değişimi Şekil 5'te gösterilmektedir. Maksimum güneş enerjisinin elde edilebileceği eğim $30,5^\circ$ güneye yönlendirilmiş yüzeylerde olduğu grafikten anlaşılmaktadır.

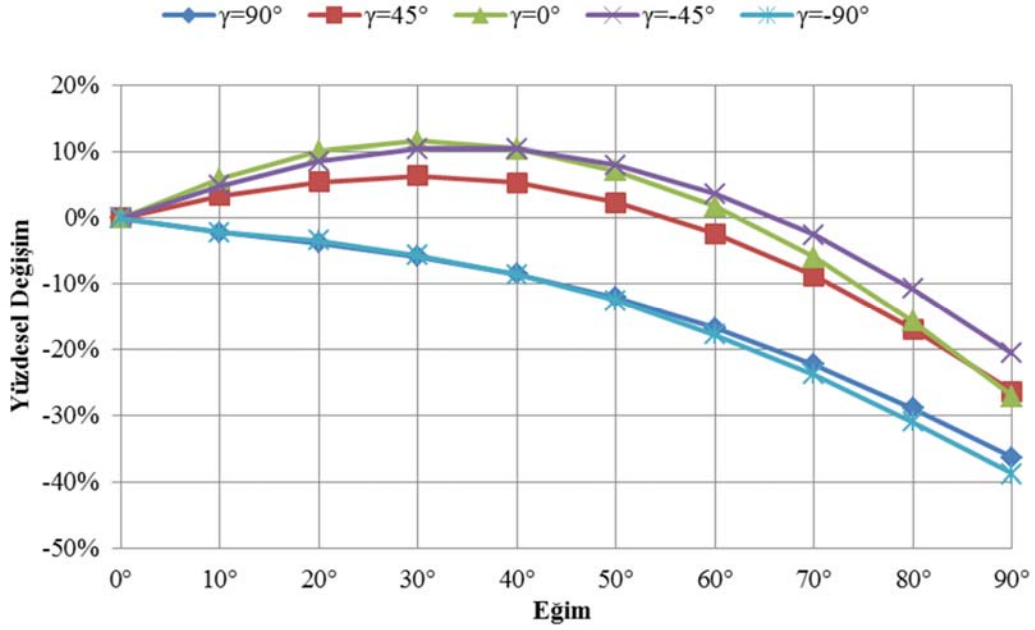
Yıllık sabit optimum eğimdeki yüzeye düşen ışınlam 2738 kWh/m^2 'dir. Güneye yönlendirilmiş 20° 'lik eğimde elde edilen ışınlam ve yüzdesel sapma sırasıyla $2699,9 \text{ kWh/m}^2$ ve $\% 1,54$ 'tür. Güneye yönlendirilmiş 40° 'lik eğimde ise bu değerler $2708,6 \text{ kWh/m}^2$ ve $\% 1,19$ 'dur. Bu aralık boyunca grafik daha stabil bir görüntü sergilemektedir. Doğu ve batıya yönlendirilmiş yüzeylerde ise eğim artışıyla birlikte elde edilen enerji azalmaktadır. Grafikte de görüleceği gibi 40° 'lik eğimden sonra bu azalma yaklaşık 3 kat daha belirgin olmaktadır. Dikey yüzeyler için ise en avantajlı yönün güneydoğu olduğu görülmektedir. Yıl boyunca sabit $\gamma=-45^\circ$ yüzey azimut açısında dikey yüzeye düşen maksimum güneş ışınlamı 1947 kWh/m^2 'dir. Şekil 6'da optimum eğim açılarında yıllık elde edilecek elektrik enerjisi gösterilmiştir. Yıllık elde edilen maksimum elektrik enerjisi ($\varphi-7^\circ$) eğime sahip güneye yönlendirilmiş PV panellerde elde edilir ve 438 kWh/m^2 'dir. Güneydoğu ve güneybatı yönlü yüzeylerdeki optimum eğimlerde elde edilen elektrik enerjisi güney yönlü yüzeylerden elde edilene göre sırasıyla yaklaşık $\% 1$ ve $\% 4$ daha az çıkmıştır. Doğu ve batı yönler için ise yıllık optimum

Tablo 1. Optimum eğim açıları ve toplanan ortalama günlük güneş ışınlamı değerleri
(The collected average daily solar radiations at the optimum tilt angles)

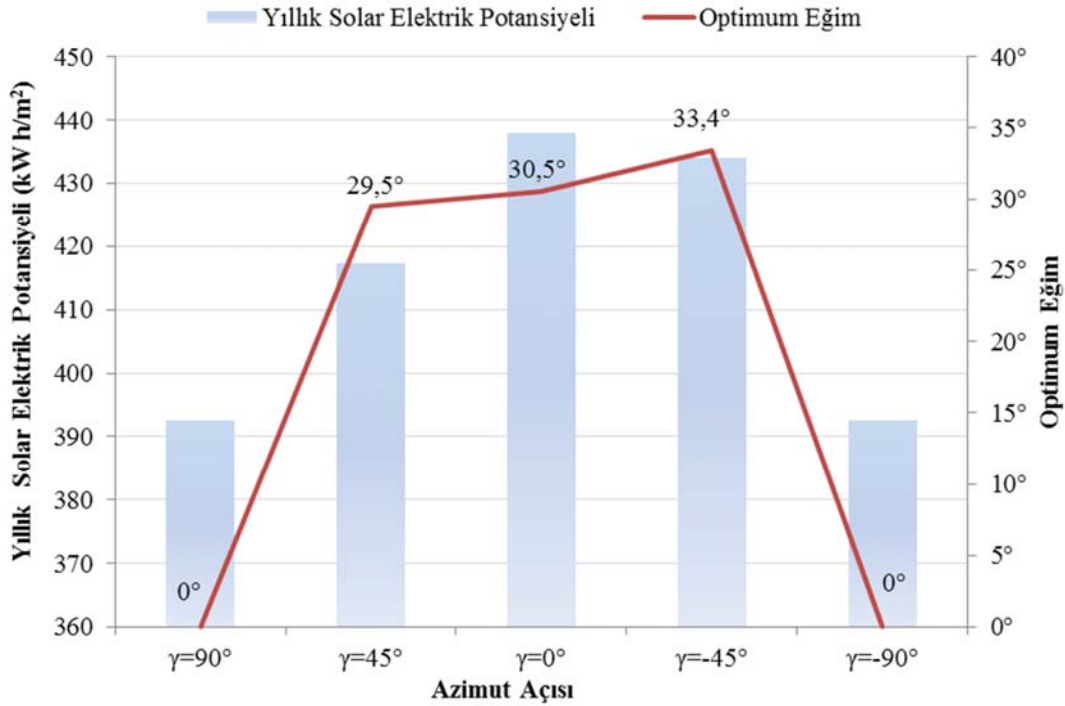
	Doğu $\gamma=90^\circ$		Güneydoğu $\gamma=45^\circ$		Güney $\gamma=0^\circ$		Güneybatı $\gamma=-45^\circ$		Batı $\gamma=-90^\circ$	
	Güneş Işınımı (kWh/m ²)	Opt. Eği m (°)	Güneş Işınımı (kWh/m ²)	Opt. Eği m (°)	Güneş Işınımı (kWh/m ²)	Opt. Eği m (°)	Güneş Işınımı (kWh/m ²)	Opt. Eği m (°)	Güneş Işınımı (kWh/m ²)	Opt. Eği m (°)
Ocak	3,6	0,0	5,4	54,7	6,5	62,7	5,3	52,6	3,6	3,3
Şubat	4,0	0,0	4,6	43,7	5,3	54,9	5,2	55,1	4,0	0,0
Mart	6,5	0,0	7,4	36,1	8,0	41,1	7,6	40,5	6,5	0,0
Nisan	7,9	0,0	8,2	17,9	8,2	16,4	8,5	26,7	7,9	0,0
Mayıs	8,0	0,0	8,0	0,0	8,1	0,0	8,1	7,7	8,1	10,4
Haziran	10,2	0,0	10,2	0,0	10,3	0,0	10,3	1,6	10,3	0,0
Temmuz	9,3	7,3	9,3	0,0	9,2	0,0	9,3	0,0	9,2	0,0
Ağustos	9,0	2,9	9,1	13,3	9,2	6,8	9,1	13,7	9,0	4,2
Eylül	9,0	0,0	10,3	38,4	10,4	33,5	9,9	33,4	8,9	3,3
Ekim	5,3	0,0	6,2	37,1	7,7	49,8	7,6	51,3	5,4	0,0
Kasım	4,1	0,0	5,7	50,1	7,3	60,7	6,3	54,5	4,2	0,0
Aralık	3,3	36,9	5,6	61,9	6,9	68,5	5,3	60,7	3,2	13,3

Tablo 2. Güneye yönlendirilmiş yüzeyler için bulunan optimum eğimin Nijegorodov vd. bağıntılarıyla karşılaştırılması [4]
(The comparison of Nijegorodov equations [4] with the optimum slopes for south facing surfaces.)

Aylar	[4] Nijegorodov vd. bağıntıları	[4] Bağıntılar kullanılarak elde edilen β_{opt} (°)	Bu çalışmada elde edilen β_{opt} (°)
Ocak	$0,89\varphi+29^\circ$	62,1	62,7
Şubat	$0,97\varphi+17^\circ$	52,9	54,9
Mart	$\varphi+4^\circ$	41,1	41,1
Nisan	$\varphi-10^\circ$	27,1	16,4
Mayıs	$0,93\varphi-24^\circ$	10,5	0,0
Haziran	$0,87\varphi-34^\circ$	-1,7	0,0
Temmuz	$0,89\varphi-30^\circ$	3,1	0,0
Ağustos	$0,97\varphi-17^\circ$	18,9	6,8
Eylül	$\varphi-2^\circ$	35,1	33,5
Ekim	$\varphi+12^\circ$	49,1	49,8
Kasım	$0,93\varphi+25^\circ$	59,5	60,7
Aralık	$0,87\varphi+34^\circ$	66,3	68,5



Şekil 5. Sabit azimut açılarında eğimli yüzeye yıl boyunca düşen güneş ışınım değerlerinin yatay yüzeye göre yüzdesel değişiminin yüzey eğimiyle değişimi (Variation of the percentage change of the solar radiation respect to horizontal surface with tilt angle at constant azimuth angles during a year)



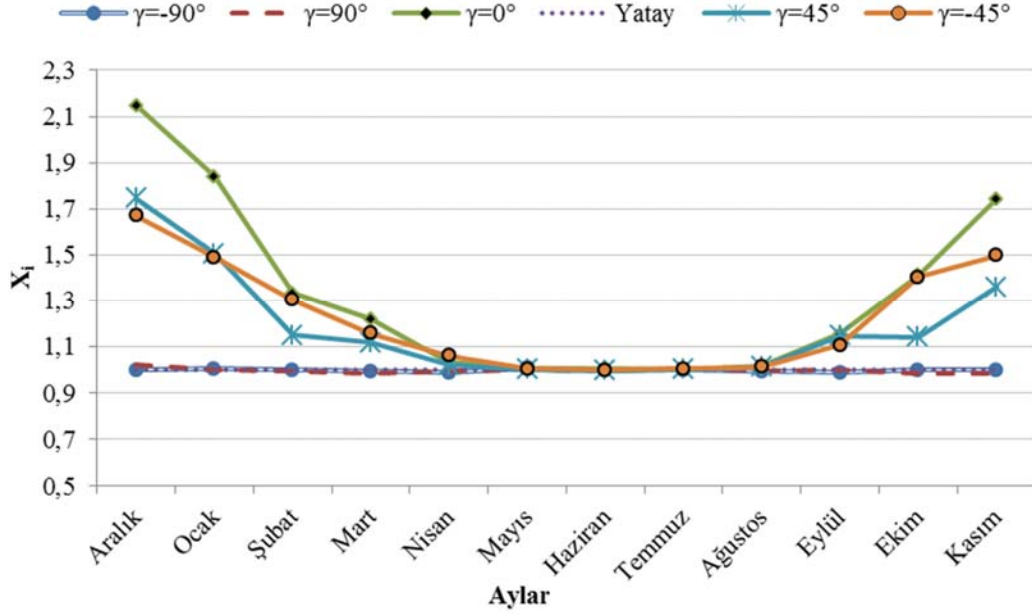
Şekil 6. Sabit azimut açılarında ve optimum eğimlerde yıllık elektrik enerjisi potansiyelleri (Annual electrical energy potentials at optimum tilt angles with constant azimuth angles)

eğim açısı 0° 'ye eşittir. Güneye yönelmiş panellerin yıllık sabit optimum eğimde yatay yüzeye göre enerji kazancı yaklaşık % 11,5'e ulaşmaktadır. Şekil 7'de PV sistemlerde aylık toplam elektrik enerjisi üretimi bazında boyutsuz değerler sunulmuştur. Belirlenen azimut açılarında optimum

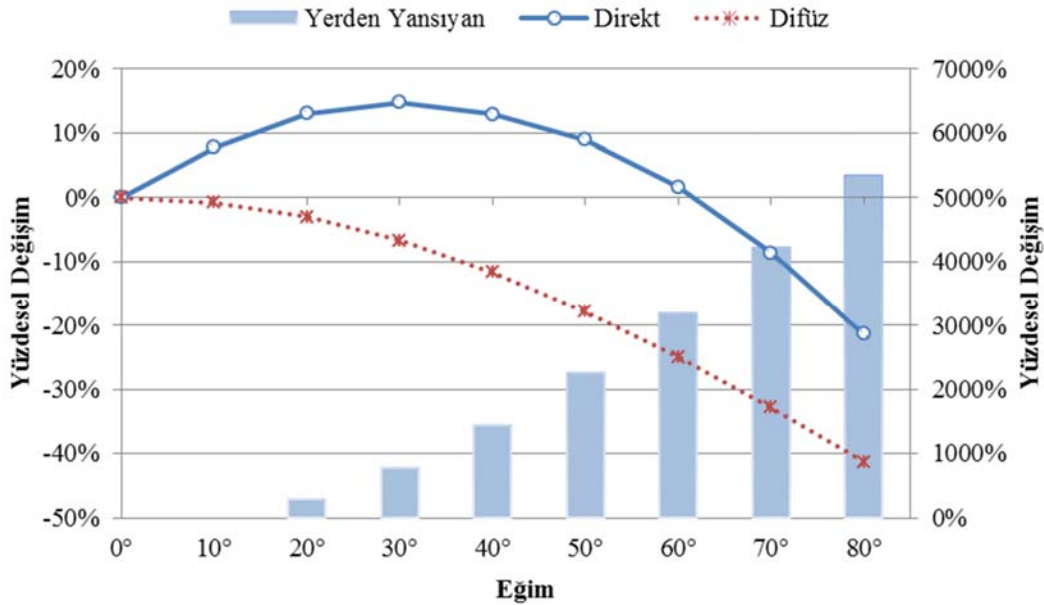
eğimlerde aylık toplam elektrik enerjisi hesaplanmış ve yılın her bir ayı için yatay yüzeyde elde edilen elektrik enerjisine oranlanarak boyutsuz elektrik enerji üretimi X_i belirlenmiştir. Şekilde görüleceği gibi en belirgin sapma güney cepheli PV paneller için kış aylarında olmaktadır.

Aralık ayı için güney cepheli (34 kWh/m^2) optimum değerlerde PV sistemden elde edilen elektrik enerjisi yatay ve doğu cepheli ($15,9 \text{ kWh/m}^2$) sisteme kıyasla aylık olarak % 115 daha fazladır. Boyutsuz elektrik enerjisi üretim katsayısındaki sapma en az Mayıs–Ağustos ayları arasında görülmektedir. Bu aylarda maksimum % 2'lik sapma ile Ağustos ayında güney cephede görülmektedir. PV panellerin yataya göre eğim açısıyla birlikte değişen enerji toplama potansiyelleri yüzdesel olarak Şekil 8'de değerlendirilmiştir.

Şekilde görüldüğü gibi güney yönünde 30° eğim açısı civarında yıllık toplanan direkt radyasyon maksimum değere ulaşmaktadır. Yıllık direkt ışınım performansı açısından 60° 'lik eğimden sonrası için yataya göre hiç avantajı olmadığı görülmektedir. Buna karşın yataydan itibaren azalmakta olan difüz ışınımında ise 10° 'den itibaren belirgin bir düşüş görülmektedir. Her 10° 'lik eğimle birlikte yatay yüzeye göre toplanan difüz ışınımında yaklaşık % 5'lik bir azalma görülmektedir. 30° 'lik eğimde yerden yansıyan



Şekil 7. Aylık toplam elektrik enerjisi üretiminin boyutsuz değerleri (Dimensionless values of monthly total electricity energy production)



Şekil 8. Güney yönlü PV panellerde direkt, difüz ve yerden yansıyan ışınımın yüzey eğim açısıyla değişimi (Variation of direct, diffuse and ground reflected radiation with tilt angle for south facing PV panels)

ışınım 8 kat artmaktadır ama bu artış görecelidir çünkü yerden yansıyan ışınımın toplam ışınımına oranı % 1 (0,03 kWh/m²) civarındadır. Bu eğimde yerden yansıyan ışınımın direkt ve difüz ışınımına oranı ise sırasıyla % 76 ve % 23 'tür.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

β	: Eğim, [°]
γ	: Yüzey azimut açısı, [°]
δ	: Deklinasyon, [°]
θ	: Geliş açısı [°]
θ_z	: Zenit açısı [°]
ρ_g	: Yerden yansıma katsayısı
φ	: Enlem, [°]
ω	: Saat açısı, [°]
I	: Yatay yüzeye düşen saatlik toplam güneş ışınımı [W/m ²]
I_b	: Yatay yüzeye düşen saatlik direkt güneş ışınımı [W/m ²]
I_d	: Yatay yüzeye düşen saatlik difüz güneş ışınımı [W/m ²]
I_T	: Eğik yüzeye düşen saatlik toplam güneş ışınımı [W/m ²]
n	: Yılın günü
R_b	: Geometrik faktör
E	: Enerji [J]
A	: Alan [m ²]
r	: Panel verimi [%]
H	: Eğik yüzeye düşen aylık toplam güneş ışınım enerjisi [W/m ²]
Pr	: Performans oranı [%]
E_p	: Enerji toplama potansiyeli [%]
E_T	: Eğik yüzeye düşen enerji [J]
opt	: Optimum

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma sonucunda verilen yerel enlemden özellikle binaya entegre PV sistem uygulamalarında kullanılmak üzere optimum aylık ve yıllık eğimler belirlenmiştir. Optimum eğimlerde düşen ışınım ve elektrik üretimi hesaplanarak farklı azimut açılarına göre değişimi incelenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

Yıllık ortalama optimum eğim açısı güney ($\gamma=0^\circ$) yönünde ($\varphi=7^\circ$) olarak bulunmuştur. Yıllık sabit optimum eğimde üretilen elektrik enerjisi (438 kW h/m²) altı aylık aralıklarla (Ekim-Mart arası, $\varphi+19^\circ$) (Nisan-Eylül arası, $\varphi-28^\circ$) değişen eğimlerde üretilen elektrik enerjisinden % 2,3 daha azdır. Mevsimlik değişen optimum eğimlerde üretilen elektrik enerjisi ile aylık değişen optimum eğimlerde üretilen enerjinin yıllık optimum eğimdeki üretimle kıyaslandığında sırasıyla % 6,8 ve % 8,2 daha fazla enerji elde etmek mümkündür.

Güney yönlü panellerde 20° ile 40° arasındaki eğimlerde elde edilen yıllık toplam ışınımın yatayda elde edilene göre sapması daha stabildir ve bu eğim aralığında maksimum değerden sapma %1,5 civarında seyretmektedir. Bu hata

oranıyla optimum eğim güney yönünde $\varphi=20^\circ$ ile φ arası kabul edilebilir. Doğu ve batıya yönlendirilmiş PV panellerin yatay yüzeye göre hiçbir avantajı yoktur. 40° 'lik eğime kadar her 10° 'lik eğimde yatay yüzeye göre yaklaşık % 2'lik bir kayıp varken 40° 'den sonraki her 10° 'lik eğimde bu kayıp % 6'ya çıkmaktadır. Dikey yüzeylerde yıllık optimum azimut açısı $\gamma=-45^\circ$ 'dir. Bu yönde yataya göre % 20,6 daha az enerji elde edilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Duffie J.A. ve Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, New Jersey, 2013.
2. Kacira M., Simsek M., Babur Y., Demirkol S., Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey, Renewable Energy, 29, 1265–1275, 2004.
3. Ülgen K., Optimum tilt angle for solar collectors, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 28 (13), 1171-1180, 2006.
4. Günerhan H., Hepbasli A., Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications, Building Environment, 42, 779–783, 2007.
5. SamarehSalavatiPour H., KhademhosseiniBeheshti H., Rahnama M., The gain of the energy under the optimum angles of solar panels during a year in Isfahan, Iran, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 33 (13), 1281-1290, 2011.
6. Bakirci K., Correlations for optimum tilt angles of solar collectors: a case study in Erzurum, Turkey, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 34 (11), 983-993, 2012.
7. Khatib T., Mohamed A., Mahmoud M., ve Sopian K., Optimization of the Tilt Angle of Solar Panels for Malaysia, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 37 (6), 606-61, 2015.
8. Yang H., Lu L., The optimum tilt angles and orientations of pv claddings for building-integrated photovoltaic (BIPV) applications, ASME. J. Sol. Energy Eng., 129 (2), 253-255, 2005.
9. Açıkan E., Ülgen K., Effect of Collector Slope and Orientation on Solar Energy Utilization, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (4), 1304-4915, 2012.
10. Jafarkazemi F., Saadabadi S. A., Optimum tilt angle and orientation of solar surfaces in Abu Dhabi, UAE, Renewable Energy, 56, 44-49, 2013.
11. Le Roux, W. G., Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data, Renewable Energy, 96, 603-612, 2016.
12. Aktacir M. A., Bulut, H., İşiker Y. ve Yeşilata B., Güneş Enerjisi Uygulamalarının Potansiyelini Belirlemek İçin Toplam, Direkt Ve Yayılı Güneş Işınım Şiddetlerinin Anlık Ölçümü, Uluslararası Katılımlı Kamu-Üniversite-Sanayi İşbirliği Sempozyumu ve Mermencilik Şurası Sempozyumu, Diyarbakır (UDUSIS 2010), 484-490, 24-26 Mayıs, 2010.

13. Karaman İ., Arróyave R., Masad E., Proceedings of the TMS Middle East - Mediterranean Materials Congress on Energy and Infrastructure Systems MEMA 2015, ISBN: 978-1-119-06527-2 January 2015, Springer, 2016.
14. Ullal H. S., Zweibel K., von Roedern B., Polycrystalline thin film photovoltaics: Research, development, and Technologies, Proc. of the 29th IEEE PV Specialist Conference , New Orleans, Louisiana, 472-477, Mayıs 2002.

