



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Kabul Edilmiş Makale/Accepted Manuscript

Başlık: Binaya entegre fotovoltaik sistemlerde azimut ve eğim açısı etkilerinin incelenmesi

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

Yazarlar/Authors: Erdal Yıldırım, Mehmet Azmi Aktacir

ID: 5000211399

DOI: <https://doi.or./10.17341/gazimmfd.416413>

Dergi İsmi: *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*

Journal Name: *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*

Geliş Tarihi/Received Date: 06.02.2017

Kabul Tarihi/Accepted Date: 31.03.2017

Makale Atf Formatı/Manuscript Citation Format:

Erdal Yıldırım, Mehmet Azmi Aktacir, Investigation of azimuth and tilt angle effects on building integrated photovoltaic systems, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* (2018), <https://doi.or./10.17341/gazimmfd.416413>

Dergi Bilgi Notu:

Bu PDF belgesi, kabul edilmiş olan makalenin dizgi işlemi yapılmamış halidir. Kabul edilmiş makalelerin kullanılabilir olması amacıyla makalenin dizgisiz hali internet üzerinden yayımlanmıştır. Makale, nihai formunda yayımlanmadan önce yazım ve dilbilgisi olarak kontrol edilecek, daha sonra dizgilenecek ve yeniden gözden geçirilmesi işlemine tabi tutulacaktır. Bu dizgileme işlemleri esnasında içeriği etkileyebilecek hataların bulunabileceğini ve Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Dergisi için geçerli olan yasal sorumluluk reddi beyanlarının bulunduğunu lütfen unutmayın.

Journal Early View Note:

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.



Binaya entegre fotovoltaik sistemlerde azimut ve eğim açısı etkilerinin incelenmesi

Erdal Yıldırım*, Mehmet Azmi Aktacir

Harran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Eyyübiye Yerleşkesi, 63200, Şanlıurfa

Öne Çıkanlar

- 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

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 eğim ~ 1.5 hata oranıyla $\sim(\varphi - 20^\circ)$ ile $\sim(\varphi)$ arasında olduğu belirlenmiştir. Dikey yüzeyler için belirli azimut açıları arasında maksimum enerji $\gamma = -45^\circ$ de (güneydoğu) elde edilmiştir ve yatay yüzeye göre % 20.6 daha azdır.

Anahtar Kelimeler: Optimum eğim, güneş ışınımı, binaya entegre fotovoltaik paneller

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

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

Abstract

One of the most commonly used renewable energy systems to meet the building energy needs is photovoltaic panels. 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 as annual and monthly for Şanlıurfa (37.1° N ve 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 were determined between $\sim(\varphi - 20^\circ)$ and $\sim(\varphi)$ with an error $\sim 1.5\%$. For vertical surfaces, the maximum energy within the certain azimuth angles is obtained at $\gamma = -45^\circ$ and is 20.6 % less than the horizontal surface's.

Key Words: Optimum tilt angles, solar radiation, building integrated photovoltaic panels

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 enerji 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 açılarındaki 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 kolektörlerdeki optimum aylık, mevsimlik ve yıllık eğimler hesaplanmıştır. Optimum eğim yaz ayları için ($\approx \varphi - 34^\circ$) kış ayları için ($\approx \varphi + 19^\circ$) olarak bulunurken yıllık eğim ise 30.3° bulunmuştur. Yine İzmir'e ($38.46^\circ K$) [4] ait deneysel veriler kullanılarak, bina uygulamaları için güneşe yönlendirilmiş güneş kolektörlerinin optimum eğim açısı belirlenmeye çalışılmıştır. İzmir'e yakın enleme sahip İsfahan ($32^\circ K$) İran için [5] aylık ve yıllık optimum eğim açıları literatürdeki farklı hesaplama yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Yıllık optimum eğim açısı 28.84° bulunmuştur. Benzer bir diğer çalışmada [6] ise Erzurum'da ($39.55^\circ K$) güneşe yönlendirilmiş kolektörler için optimum aylık eğimin belirlenmesinde genel bir bağıntı elde edilmesi amaçlanmıştır. Yıllık optimum eğim ise 34.3° 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 hedeflemiştir. 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 yönde 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 açıları incelenen tüm yönler için PV panellerden yıllık elektrik üretim değerleri hesaplanmıştır. Son adımda ise, değişen azimut açısıyla optimum eğimdeki yüzeylerin yatay yüzeye düşen ışınım değerlerinden sapması boyutsuz olarak ifade edilmiştir. Ayrıca $0^\circ - 90^\circ$ eğim açıları elde edilen direkt, difüz ve yerden yansıyan güneş ışınımı elemanlarının yatay yüzeye düşen ışınım ile karşılaştırılarak yüzdesel değişimi gösterilmiştir. Çalışmanın sonucunda BIPV uygulamaları için pratik bilgiler verilmiştir.

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°K) kurulu olan ölçüm sisteminden elde edilmiştir. Direkt güneş ışınım ölçümünde Kipp & Zonen 2AP Güneş takip sistemine monte edilmiş CH-1 model, $9.76 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$ hassasiyetinde pirheliyometre ve difüz ışınım ölçümünde ise CMP11 model, $8.89 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$ hassasiyetinde prinometre kullanılmıştır [12]. Veriler 2012 yılına aittir ve $10'$ ar dakikalıklarla 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 modelde kullanılmıştır. Bu metotla eğik yüzeye düşen toplam güneş ışınımı aşağıdaki gibi hesaplanır;

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

Eşitlik 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 aşağıdaki 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 aşağıdaki gibi ifade edilir [1],

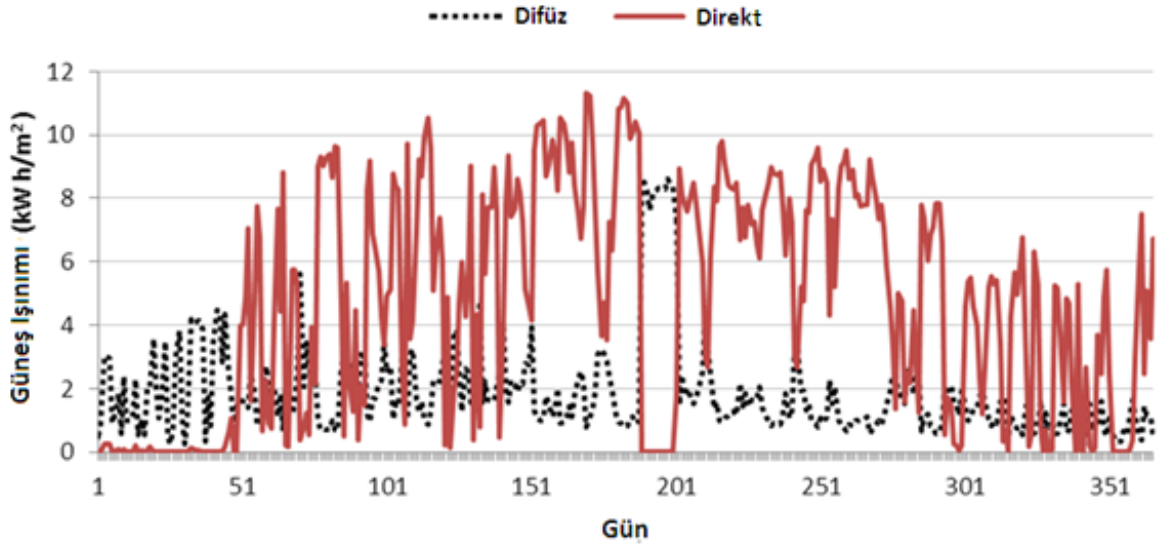
$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\beta) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma)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

Yatay yüzeyler için geliş açısı zenit açısına eşittir, θ_z . Bu durumda eğim açısı $\beta = 0$ olur ve eşitlik aşağıda verilen 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 [1]'de verilen aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanır,

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



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

Eğik yüzeye düşen aylık toplam güneş ışınım enerjisi saatlik ışınımların toplanmasıyla elde edilir ve aşağıda 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 değerlerinin toplamıdır. Bir fotovoltaik sistemin çıktısı olarak üretilen elektriği belirlemek için genel formül aşağıdaki 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. kayıplarını 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 aşağıdaki gibi hesaplanır,

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

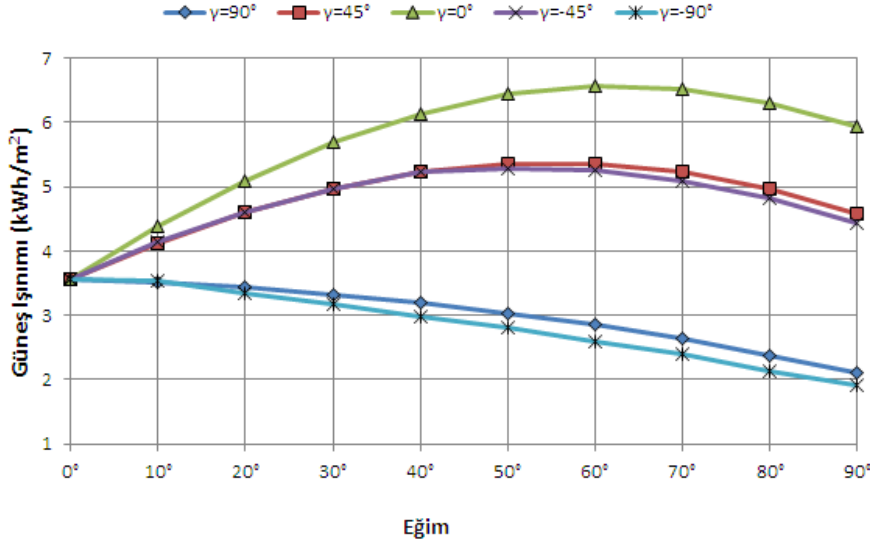
PV panellerin yataya göre eğim açısıyla birlikte değişen enerji toplama potansiyelleri E_p , yüzdesel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir,

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

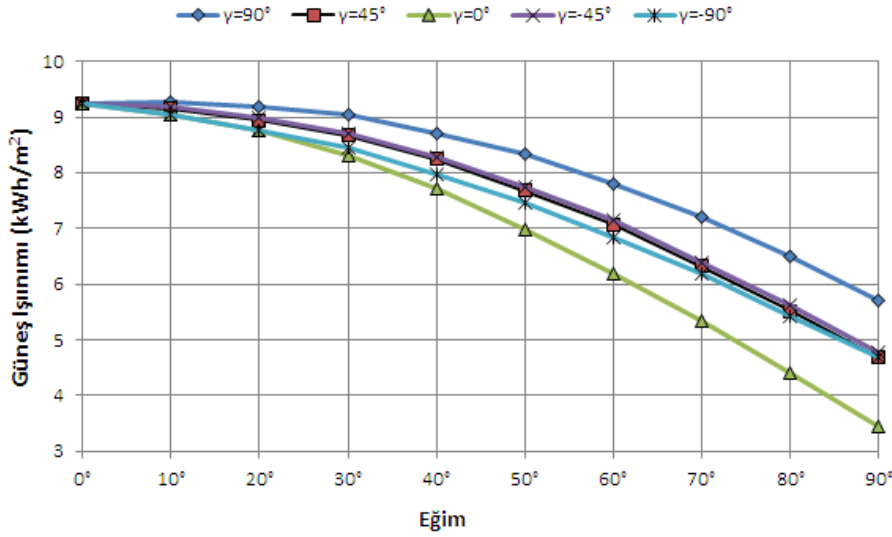
Gerçekleştirilen analizde değişik eğim açılarındaki ortalama günlük güneş ışınımının hesaplanmasında tipik gün kullanılmıştır. Her ayın ortasında yer alan gün tipik gün olarak kabul edilmiştir. Günlük güneş ışınım değerleri $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ aralığındaki eğimler için hesaplanmıştır.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

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Şanlıurfa meteorolojik koşulları dikkate alınarak yapılan bu çalışmada, sabit azimut açılarındaki 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'de 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 günlük toplanabilen ortalama güneş ışınımında yaklaşık 0.2 kW 'lık bir düşüş görülmektedir. Şekil 3'den görüleceği gibi, Temmuz ayı için maksimum güneş ışınımı, eğim açısının yaklaşık 7° olduğu doğu yönünde elde edilmiştir. Temmuz ayı için farklı azimut açılarındaki yüzey eğim açısının değişimiyle elde edilen günlük güneş ışınım dağılımı benzer profillerde elde edilmiştir.



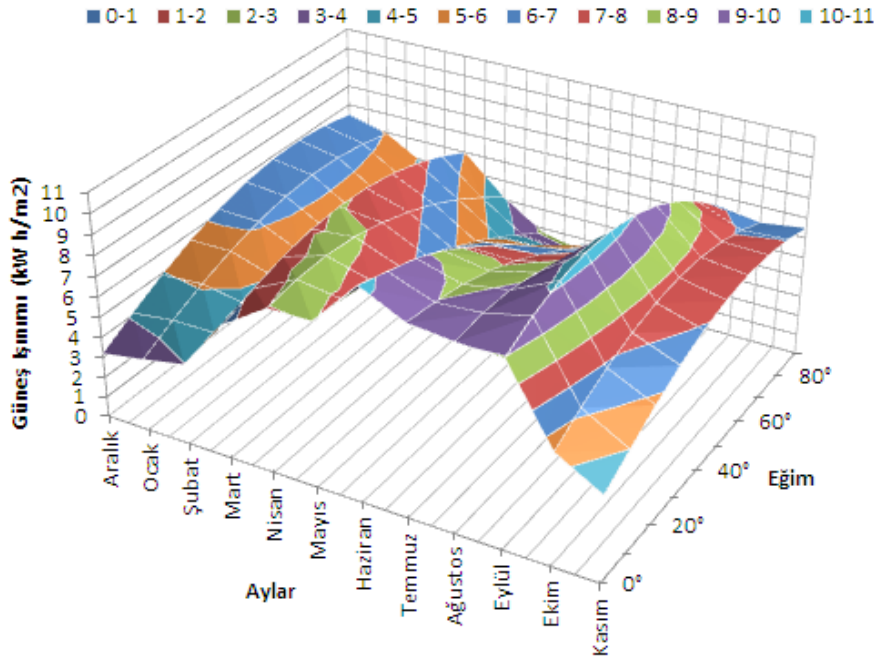
Şekil 2. Ocak ayı için farklı azimut açılarında yüzey eğim açısının değişimiyle elde edilen günlük güneş ışınımı dağılımı (Daily solar radiation distribution obtained by varying tilt angle at different azimuth angles for January)



Şekil 3. Temmuz 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 different azimuth angles for July)

Şekil 4'te yılın bütün ayları için güney cephesi ($\gamma = 0^\circ$)'de yüzey eğim açısının $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 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 'tır 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 açlarına yönlendirilmiş yüzeyler için optimum eğim açıları belirlenmiş ve aylık optimum yüzey eğimlerinde elde edilecek maksimum güneş ışınımları hesaplanmıştır. En belirgin aylık eğim açılarındaki fark ise kış ayları içindir. Güney yönlü yüzeylerde Aralık ayında maksimum (68.5°) değerini almıştır. Yüzey eğiminin aylık değiştirilmesiyle toplanabilecek maksimum güneş enerjisi 2963.3 kWh/m^2 ’dir. Güney yönlü yüzeylerde optimum eğim Ekim-Mart arası ortalama 56.3° bulunurken Nisan-Eylül ayları arası bu değer 9.5° ’tir. Belirlenen bu altı aylık periyotlar için toplanan toplam günlük ortalama güneş ışınımı sırasıyla 7 kWh/m^2 ve 9.2 kWh/m^2 ’dir. Bu eğimler kullanıldığında yıllık toplanabilen güneş ışınımı 2802.2 kWh/m^2 ’dir. Mevsimsel olarak optimum eğimlere baktığımızda, güney yönlü yüzeyler için optimum eğim ve günlük ışınım değerleri sırasıyla, kış mevsimi (Aralık, Ocak, Şubat) için 62° ve 6.2 kWh/m^2 , ilkbahar (Mart, Nisan, Mayıs) için 19.2° ve 8.1 kWh/m^2 yaz (Haziran, Temmuz, Ağustos) için 2.3° ve 9.6 kWh/m^2 ve son bahar (Eylül, Ekim, Kasım) için 48° ve 8.5 kWh/m^2 ’tür. Yüzey eğim açısının mevsimlik değişmesiyle elde edilen toplam güneş ışınımı 2922.9 kWh/m^2 ’dir. Bu çalışma sonucunda elde edilen optimum eğimler Nijegorodov ve ark. [4]’na ait bağıntılar kullanılarak elde edilen optimum eğimlerle karşılaştırılmıştır. Her bir ay için verilen bu bağıntılardan elde edilen sonuçlarla sunulan bu çalışmadaki sonuçların uyumlu olduğu Tablo 2’den de anlaşılmaktadır



Şekil 4. Güneye yönlendirilmiş yüzeylerin her bir ay için ortalama günlük güneş ışınım değerlerinin eğim açısıyla değişimi (Variation of the average Daily solar radiation values for each month of the southward directed surfaces with the tilt angle)

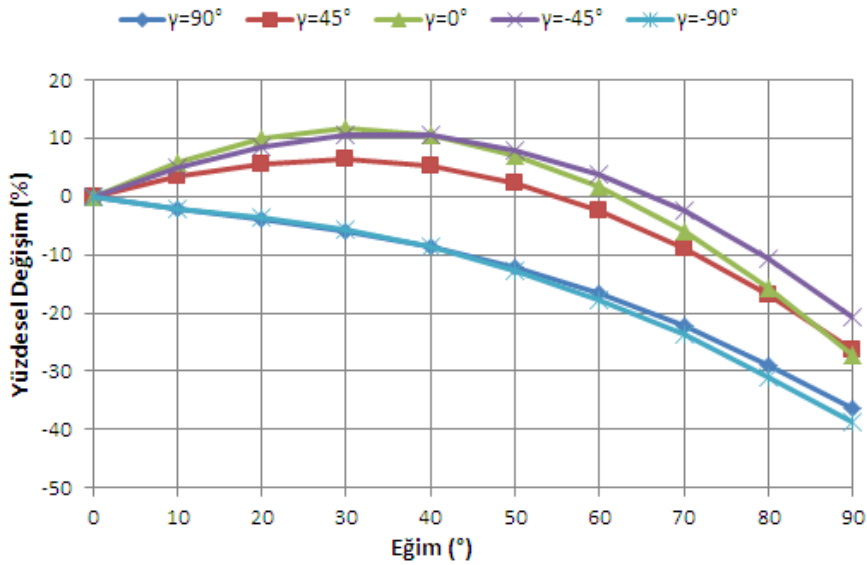
Tablo 1. Optimum eğim açıları ve toplanan ortalama günlük güneş ışınımı değerleri (The collected average daily solar radiations at the optimum tilt angles)

	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)	Optimum Eğim (°)	Güneş Işınımı (kWh/m ²)	Optimum Eğim (°)	Güneş Işınımı (kWh/m ²)	Optimum Eğim (°)	Güneş Işınımı (kWh/m ²)	Optimum Eğim (°)	Güneş Işınımı (kWh/m ²)	Optimum Eğim (°)
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

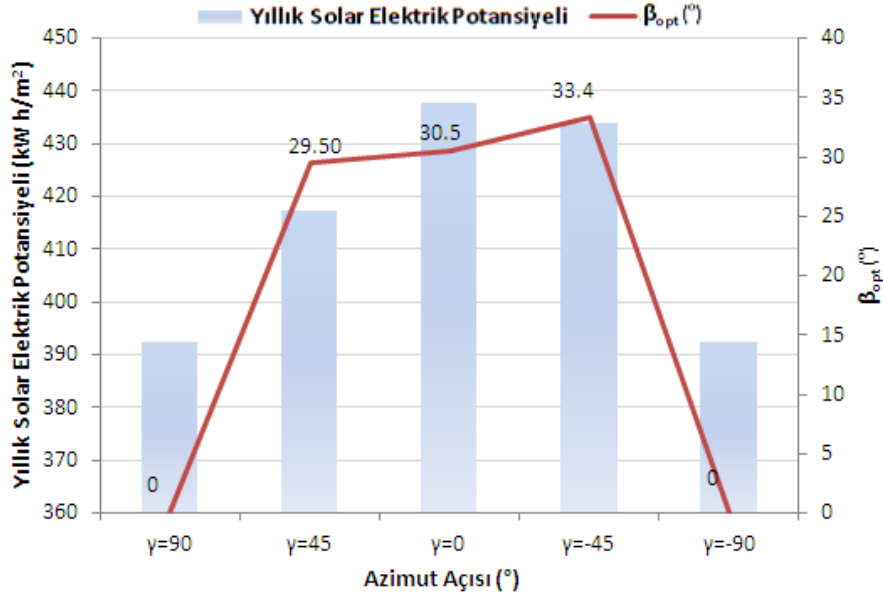
Tablo 2. Güneye yönlendirilmiş yüzeyler için bulunan optimum eğimin Nijegorodov ve ark. bağıntılarıyla karşılaştırılması[4] (The comparison of Nijegorodov equations[4] with the optimum slopes for southward directed surfaces.)

Aylar	[4] Nijegorodov ve ark. 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

Değişen azimut açılarında eğimli yüzeye bir yıl boyunca düşen ışınım miktarının yatay yüzeye düşen yıllık ışınım miktarına oranının yüzdesel ifadesinin yüzey eğimiyle birlikte değişimi Şekil 5'te gösterilmektedir. Maksimum güneş enerjisinin elde edilebileceği eğim 30.5° güneye yönlendirilmiş yüzeylerde olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Yıllık sabit optimum eğimdeki yüzeye düşen ışınım $\sim 2738 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. Güneye yönlendirilmiş 20° 'lik eğimde elde edilen ışınım ve yüzdesel sapma sırasıyla 2699.9 kWh/m^2 ve $\% 1.54$ 'tür. Güneye yönlendirilmiş 40° 'lik eğimde ise bu değerler 2708.6 kWh/m^2 ve $\% 1.19$ 'dur. Bu aralık boyunca grafik daha stabil bir görüntü sergilemektedir. Doğu ve batıya yönlendirilmiş yüzeylerde ise eğim artışıyla 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 ise güneydoğu olduğu görülmektedir. Yıl boyunca sabit $\gamma = -45^\circ$ yüzey azimut açısında dikey yüzeye düşen maksimum güneş ışınımı 1947 kWh/m^2 'dir. Şekil 6'da optimum eğim açılarında yıllık elde edilecek elektrik enerjisi gösterilmiştir. Yıllık elde edilen maksimum elektrik enerjisi $\sim (\varphi - 7^\circ)$ eğime sahip güneye yönlendirilmiş PV panellerde elde edilir ve $\sim 438 \text{ kWh/m}^2$ '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 eğim açısı 0° 'ye eşittir. Güneye yönelmiş panellerin yıllık sabit optimum eğimde yatay yüzeye göre enerji kazancı yaklaşık $\% 11.5$ 'e ulaşmaktadır.

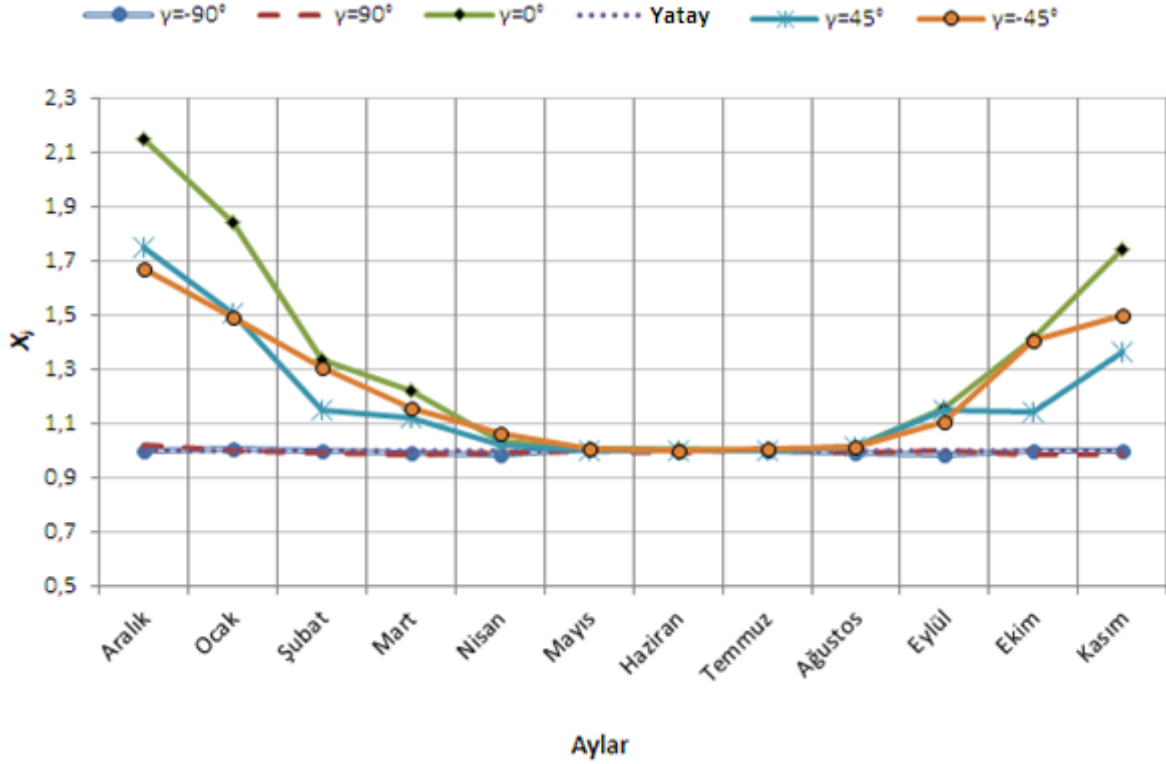


Şekil 5. Sabit azimut açılarında eğimli yüzeye yıl boyunca düşen güneş ışınım değerlerinin yatay yüzeye göre yüzdesel değişiminin yüzey eğimiyle değişimi (Variation of the percentage change of the solar radiation respect to horizontal surface with tilt angle at constant azimuth angles during a year)

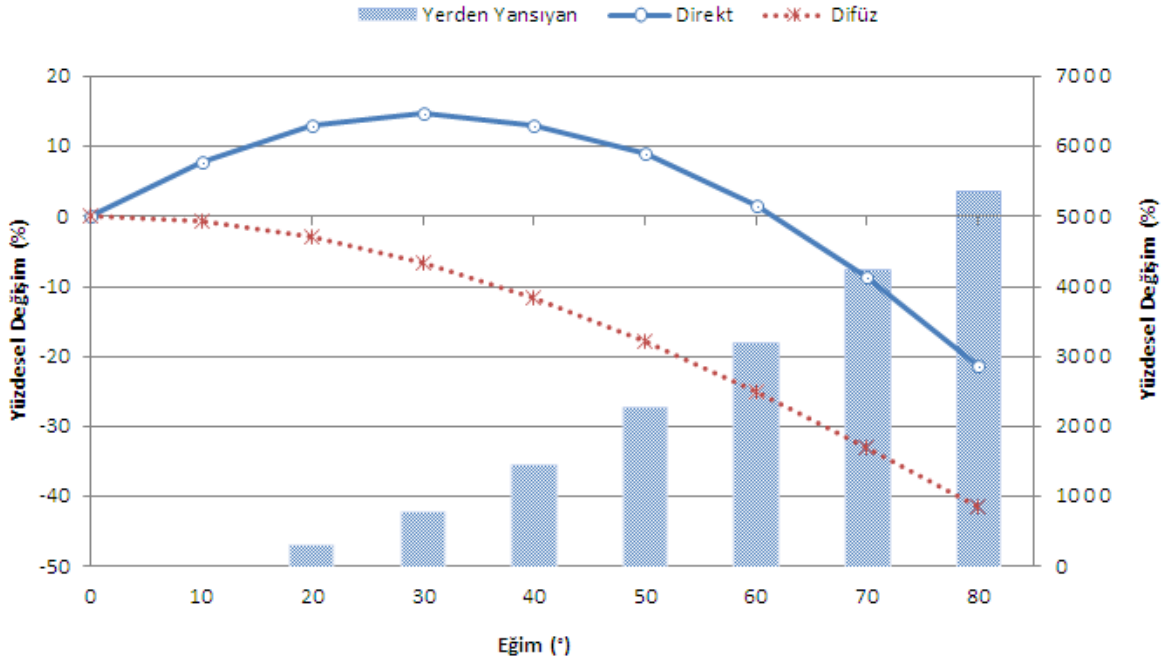


Şekil 6. Sabit azimut açılarında ve optimum eğimlerde yıllık elektrik enerjisi potansiyelleri (Annual electrical energy potentials at optimum tilt angles with constant azimuth angles)

Şekil 7’de PV sistemlerde aylık toplam elektrik enerjisi üretimleri 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 enerjisi 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 edilen elektrik enerjisi yatay ve doğu cepheli (15.9 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 sapmayla Ağustos ayında güney cephede (45.5 kWh/m^2) görülmektedir.



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 the South facing PV panels)

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 ışınım 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 ışınım 8 kat artmaktadır ama bu artış görecelidir çünkü yerden yansıyan ışınımın toplam ışınım oranı % 1 ($\sim 0.03 \text{ kWh/m}^2$) civarındadır. Bu eğimde yerden yansıyan ışınımın direkt ve difüz ışınım oranı ise sırasıyla % 76 ve % 23'tür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma sonucunda verilen yerel enlemde 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 $\sim(\varphi - 7^\circ)$ olarak bulunmuştur. Yıllık sabit optimum eğimde üretilen elektrik enerjisi ($\sim 438 \text{ kWh/m}^2$) altı aylık aralıklarla (Ekim-Mart arası, $\sim(\varphi + 19^\circ)$) (Nisan-Eylül arası, $\sim(\varphi - 28^\circ)$) 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 eğim aralığında maksimum değerden sapma $\sim\% 1.5$ civarında seyretmektedir. Bu hata oranıyla optimum eğim güney yönünde $\sim(\varphi - 20^\circ)$ ile $\sim(\varphi)$ 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 edilebilmektedir.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

β	Eğim, [$^\circ$]
γ	Yüzey azimut açısı, [$^\circ$]
δ	Deklinasyon, [$^\circ$]
θ	Geliş açısı [$^\circ$]

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

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Duffie, J.A. ve Beckman, W.A., Solar Engineering Thermal Process, Wiley-Interscience, New York, 1991.
- [2] Kacira M., Simsek M., Babur Y., ve Demirkol S., Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey, Renew. 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, Build. Environ., 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] Aan E., lgen K., Güneş enerjisi toplayıcılarında eğim ve yönlendirmenin yararlanabilirliğe etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(4), 1304-4915, 2013.
- [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., Işiker Y. ve Yeşilata B., Güneş Enerjisi Uygulamalarının Potansiyelini Belirlemek İçin Toplam, Direkt Ve Yayıllı Güneş Işınım Şiddetlerinin Anlık Ölçümü”, Uluslararası Katılımlı Kamu-Üniversite-Sanayi İşbirliği Sempozyumu ve Mermercilik Şurası Sempozyum, Diyarbakır (UDUSIS 2010) bildiriler kitabı sayfa 484-490, 24-26 Mayıs, 2010.
- [14] 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
- [15] Ullal H.S., Zweibel K., von Roedern B., Polycrystalline thin film photovoltaics: Research, development, and Technologies, Proc. Of the 29th IEEE PV Specialist Conference , La, 472-477, Mayıs 2002, New Orleans