

Atf İçin: Güner, E. (2023). İğdır İlinde Güneş Enerjisi Uygulamaları için Optimum Panel Eğim Açısının Belirlenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(4), 2905-2914.

To Cite: Güner, E. (2023). Determination of the Optimal Tilt Angles for Solar Energy Applications in İğdır Province. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(4), 2905-2914.

İğdır İlinde Güneş Enerjisi Uygulamaları için Optimum Panel Eğim Açısının Belirlenmesi

Erdoğan GÜNER^{1*}

Öne Çıkanlar:

- Eğim açısının etkisi gösterilmiştir
- Aylık optimum eğim açıları belirlenmiştir
- Aylık enerji kazancı hesaplanmıştır

Anahtar Kelimeler:

- İğdır
- eğim açısı
- güneş enerjisi
- güneş radyasyonu
- pv panel

ÖZET:

Bu çalışmada İğdır ilinde gerçekleştirilmesi planlanan güneş enerjisi uygulamaları için güneş enerjisinden en etkin bir şekilde yararlanmayı sağlayacak optimum panel eğim açıları aylık olarak belirlenmiştir. Bu amaçla güneş panelleri üzerine gelen aylık ortalama günlük toplam güneş radyasyonu (H_T) değerleri panelin eğim açısına göre hesaplanmıştır. Eğim açısı her ay için 0° ile 90° arasında 1° artımlarla değiştirilmiştir. Her aydaki en yüksek H_T değerini veren açı optimum açı olarak alınmıştır. Daha sonra aylık optimum açılardaki H_T değerleri ile panellerin yatay, enlem açısı ile, enlem açısı $\pm 15^\circ$ ile ve mevsimlik ortalama optimum açı ile yerleştirilmesi durumlarında elde edilen H_T değerleri karşılaştırılmıştır. Haziran ayında optimum açı 0° olarak elde edilirken Ocak ve Aralık aylarında optimum açının 58° olduğu görülmüştür. Panellerin aylık optimum açılar ile yerleştirilmesi durumu diğer durumlara göre %0.02 ile %55.61 arasında yüzeye daha fazla güneş radyasyonunun ulaşmasını sağlamıştır. Enlem açısına göre yerleştirilme durumuna kıyasla Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında sırasıyla %13.35, %20.89 ve %17.46'lık bir enerji kazancı sağlanmıştır. En düşük güneş radyasyonu kazancı mevsimlik ortalama optimum açıyla yerleştirilmesi durumuna göre Ekim ayında, en yüksek kazanç ise panellerin yıl boyunca yatay yerleştirilmesi durumuna göre Ocak ayında elde edilmiştir.

Determination of the Optimal Tilt Angles for Solar Energy Applications in İğdır Province

Highlights:

- The effect of tilt angle is shown
- The monthly tilt angle is determined
- The monthly energy gain is calculated

Keywords:

- İğdır
- tilt angle
- solar energy
- solar radiation
- pv panel

ABSTRACT:

In this study, the optimum panel tilt angles were determined monthly in order to benefit from solar energy more effectively for solar energy applications to be carried out in İğdır province. For this purpose, the monthly average daily total solar radiation (H_T) values on the solar panels were calculated according to the tilt angle of the panel. The tilt angle was changed from 0° to 90° in 1° increments for each month. The angle giving the highest H_T value in each month was taken as the optimum angle. Then, the H_T values at monthly optimum angles and the H_T values obtained when the panels are placed horizontally, with latitude angle, latitude angle $\pm 15^\circ$ and seasonal average optimum angle were compared. While the optimum angle was obtained as 0° in June, it was observed that the optimum angle was 58° in January and December. Placing the panels with monthly optimum angles provided 0.02% to 55.61% more solar radiation to reach the surface compared to other conditions. Compared to the latitude angle, an energy gain of 13.35%, 20.89% and 17.46% was achieved in May, June and July, respectively. The lowest solar radiation gain was obtained in October, compared to the seasonal average optimum angle, and the highest gain was obtained in January, compared to the placing horizontally throughout the year.

¹Erdoğan GÜNER ([Orcid ID: 0000-0003-4604-5485](https://orcid.org/0000-0003-4604-5485)), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Erdoğan GÜNER, e-mail: erdoganguner@atauni.edu.tr

GİRİŞ

Dünyadaki nüfus ve enerji artışı ile birlikte enerji ihtiyacı da ortaya çıkmaktadır. Günümüzde bu ihtiyacın önemli bir kısmı hâlâ fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtlar aydınlatmadan ulaşıma, ısıtma ve soğutma uygulamalarından güç üretiminde kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ancak bu kullanımlar esnasında çevreye ve dolayısıyla insan sağlığına zararlı gazlar da atmosfere atılmaktadır. Hem sağlık ve çevreye olan duyarlılığın artması hem de fosil kökenli mevcut rezervlerin azalması alternatif, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelime neden olmaktadır. Bunun yanı sıra zaman zaman ortaya çıkan enerji krizleri de ülkeleri dünyanın her tarafında bulunabilecek kaynaklara yönelmektedir.

Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Diğer enerji türlerine göre bol, temiz ve yerel uygulamalara elverişlidir. Bu avantajları güneş enerjisini oldukça cazip hale getirdiğinden güneş enerjisinden yararlanan sistemlerin sayısı da her geçen gün artmaktadır. Enerji, güneşten radyasyon yoluyla dünyaya ulaştığı için güneş enerjisinin asıl kaynağı da güneş radyasyonudur. Radyasyondan elde edilecek enerji miktarını etkileyen en önemli parametrelerden birisi kaynak ile yüzey arasındaki açıdır. Güneş radyasyonundan daha etkin bir şekilde yararlanılması için dünyanın hareketleri nedeniyle sürekli olarak değişen bu açının optimum değeri belirlenmelidir. Literatürde farklı şehirler ve bölgeler için bu değerleri hesaplayan birçok çalışma mevcuttur.

(Al-Sayyab ve ark., 2019) Basra şehrinde eğim açısının PV panellerdeki güç üretimine etkisini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak eğim açısının yıllık optimum değerinin 28° olduğunu ifade etmişlerdir.

(Conceição ve ark., 2019) Güney Portekiz’de PV bilgi sisteminden elde ettikleri verilerle kirlenmenin de etkisini içeren bir ışınım modeli oluşturmuşlar ve bu model ile kirli bir sistem için optimum eğim açısı hesaplamışlardır. Ayrıca, optimum eğim açısının uygulanmasıyla elde edilecek enerji kazancı ile sistemin eğim açısının değiştirilebilir hale getirilmesi için gerekli maliyet arasındaki dengeyi dikkate alarak optimum tasarımı seçmek için bir ekonomik analiz gerçekleştirmişlerdir.

(Jacobson ve Jadhav, 2018) tüm ülkelerdeki PV panellerin optimum eğim açılarını tahmin etmek üzerine yürüttükleri çalışmada gerekli verileri Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarındaki bir program aracılığıyla elde etmişlerdir. Optimum eğim açısını enlem açısının bir fonksiyonu olarak üçüncü dereceden basit bir eşitlik ile elde etmişlerdir.

Ülkemizdeki iller üzerine yapılan çalışmalardan (Kacira ve ark., 2004) Şanlıurfa’nın eğimli PV yüzey üzerindeki toplam güneş radyasyonunu tahmin etmek ve optimum eğim açısını belirlemek için matematiksel bir model kullanmışlardır. Aylık olarak belirlenen optimum açılarla elde edilecek olan güneş radyasyonu değerlerini mevsimlik ve enlem açısına eşit eğimli yüzeyler ile karşılaştırmışlar ve PV panellerin aylık optimum eğim açılarıyla yerleştirilmesinin sırasıyla %1.1 ve %3.9’luk bir güneş radyasyonu kazancı sağladığını ifade etmişlerdir.

(Ulgen, 2006) İzmir ilinde eğimli yüzeye sahip güneş kolektörü üzerine gelen toplam radyasyon değerlerini tahmin etmek ve optimum eğim açısını belirlemek için matematiksel model kullanmıştır. Optimum açıları Haziran ayı için 0° ve Aralık ayı için 61° olarak bulmuştur. Mevsimlik açıları ve yıllık ortalama sabit açı ile kıyasladığında güneş kolektörünün toplayabileceği en yüksek enerjinin optimum açı ile yerleştirilmesi durumunda elde edilebileceğini görmüştür.

(Bakirci, 2012a) Erzurum ili için optimum eğim açıları hesaplamış ve bu verileri mevsimsel ve yıllık verilerle karşılaştırmıştır. Ayrıca optimum açıları veren korelasyonlar da türetmiştir.

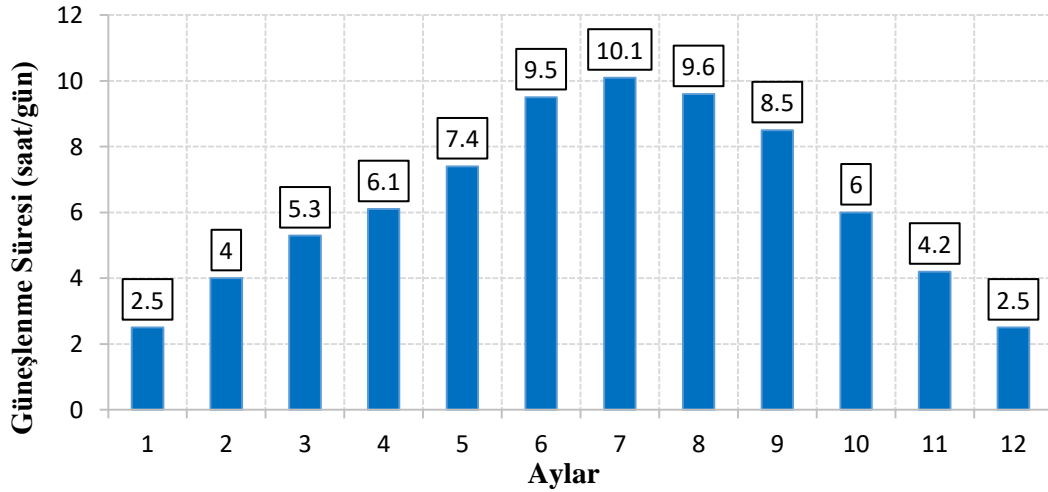
(Şahin, 2019) ise optimum açının belirlenmesi için bir yapay sinir ağı modeli önermiştir. Modelini Sinop, İstanbul, Ankara, Elâzığ, İzmir, Şanlıurfa ve Mersin illerine ait veriler ile eğitmiş ve Eskişehir ilinin verileri ile de test etmiştir.

(Bakirci, 2012b) yürüttüğü çalışmada Türkiye’den belirlediği 8 büyük il için optimum eğim açıları hesaplamış ve bu açıları belirlemek için 1., 2. ve 3. dereceden modeller türetmiştir.

İğdır ili için ise (Abed ve Al-Salami, 2022)’nin Türkiye üzerinde yaptığı çalışmada sadece kış sezonuna ait optimum açılardan bahsedilmiştir. Yapılan literatür taramasında belirtilen çalışmanın haricinde İğdır ili için güneş radyasyonundan daha fazla yararlanmayı sağlayacak tüm aylar için aylık optimum açı değerlerini veren başka bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmada İğdır iline ait aylık optimum eğim açılarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Optimum eğim açılarını belirlemek için eğimli yüzey üzerine gelen güneş radyasyonu değerleri kullanılmıştır. Güneş radyasyonu değerleri, eğimli yüzeyin 0° ile 90° arasında 1° artımlarla değiştirilmesiyle hesaplanmıştır. Daha sonra her ay için en yüksek H_T (eğimli yüzey üzerine gelen güneş radyasyonu) değerini veren açı değeri optimum olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu değerler farklı panel konumlandırma durumları için karşılaştırılmıştır. Farklı panel konumlandırma durumları; yıl boyunca yatay, enlem açısında (ϕ), Nisan-Eylül ayları için $\phi-15^\circ$, Ekim-Mart ayları için $\phi+15^\circ$ ve mevsimlik ortalama optimum açılarda konumlandırma durumlarıdır.

MATERYAL VE METOT

Dünyanın kendi etrafında dönmesi ile meydana gelen olaylar sebebiyle güneşten gelen radyasyondan en fazla güneşlenme süresi boyunca etkin bir şekilde yararlanılabilir. Türkiye’nin doğu sınırında bulunan İğdır iline ait 1941-2022 yılları arası aylık ortalama günlük güneşlenme süreleri Şekil 1’de sunulmuştur.



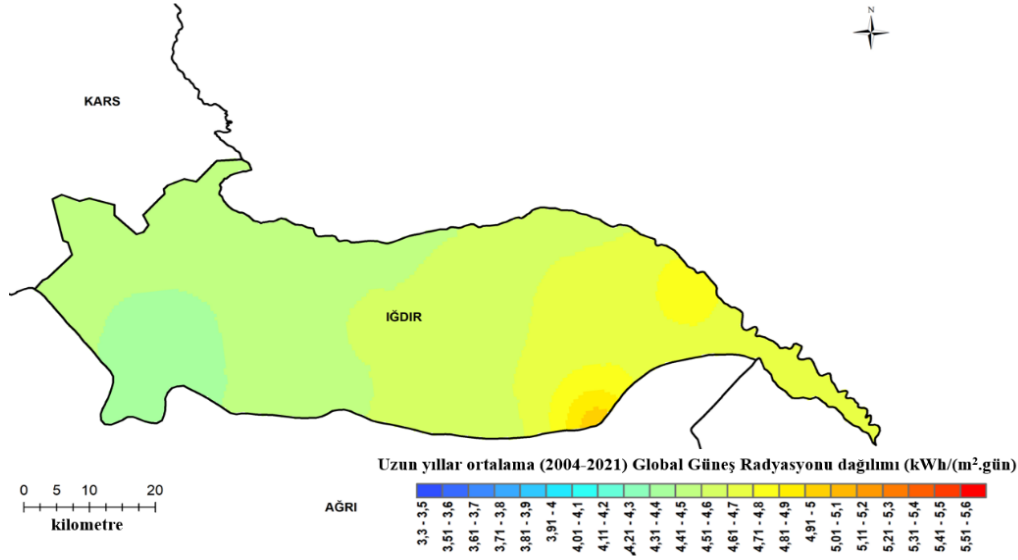
Şekil 1. İğdır İli Aylık Ortalama Güneşlenme Süreleri

İğdır ilinin en fazla güneşlenme süresinin 10.1 saat/gün ile Temmuz ayında, en az ise 2.5 saat/gün ile Ocak ve Aralık ayında olduğu Şekil 1’den görülmektedir. İğdır için güneşlenme süresi yıllık ortalaması 6.3 saat/gün olarak elde edilmiştir. 1991-2021 yılları arası Türkiye ortalaması ise 6.74 saat/gün’dür (Anonim, 2023a). İğdır’ın yıllık ortalama güneşlenme süresi hemen hemen Türkiye ortalamasına eşittir.

Türkiye’deki tüm iller için Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün internet sitesinde güneş ışınımı şiddeti yapılan bazı analizler ile değerlendirilmektedir. Bu analizlerden birisi de basit istatistiksel eşitliklere dayanan ve güneş ışınım denklemlerini çözen HELIOSAT modelidir. Bu model yardımıyla

global güneş radyasyonu, direkt ve difüz (yayı) ışınımın açık hava şartlarında hesaplanmasıyla elde edilmektedir.

Şekil 2’de HELIOSAT modele göre İğdir ilinin ortalama global güneş radyasyonu dağılımı gösterilmiştir. İlgili şekilden İğdir ilinin doğu bölgelerinin batıya kıyasla daha fazla güneş radyasyonu aldığı görülmektedir. Özellikle güney doğusuna kalan bir bölgede güneş radyasyonu en üst seviyeye ulaşmıştır.



Şekil 2. İğdir İli Ortalama Global Güneş Radyasyonu Dağılımı (Anonim, 2023b)

Eğimli Yüze Gelen Güneş Işınımı

Eğimli yüzeye gelen toplam güneş radyasyonu, yatay düzleme gelen toplam ve difüz ışınım değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışınım miktarları (H) Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nden alınmıştır. Difüz ışınım miktarı (H_d) için ise bazı eşitlikler kullanılmıştır.

Tam güneşe bakan (yüzey azimut açısı (γ) 0° olan) bir eğimli yüzey üzerine gelen aylık ortalama günlük toplam güneş ışınım miktarı (H_T) Eşitlik 1. ile hesaplanmaktadır.

$$H_T = RH \quad (1)$$

Burada R, eğik düzlem üzerine gelen günlük ortalama güneş ışınım değerinin yatay yüzeye gelen günlük ortalama güneş ışınım değerine oranıdır. R değeri (Liu ve Jordan, 1962) tarafından Eşitlik 2.’de verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2H}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \quad (2)$$

Burada H_d aylık ortalama günlük difüz ışınım miktarıdır. R_b eğik düzlem üzerine gelen direkt ışınımın yatay yüzey üzerine gelen direkt ışınımına oranı, β yüzeyin eğim açısı ve ρ çevrenin yansıtma katsayısıdır. Çevrenin yansıtma katsayısı 0.2 olarak kabul edilir. R_b ise (Liu ve Jordan, 1960) tarafından doğrudan ekvatora bakan yüzeyler için Eşitlik 3.’de verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos(\delta) \sin(\omega_s') + \omega_s'(\pi/180) \sin(\phi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \omega_s(\pi/180) \sin(\phi) \sin(\delta)} \quad (3)$$

Burada ϕ enlem açısı, δ deklinasyon açısı, ω_s güneş batış saat açısı ve ω_s' ise eğik yüzeyin güneş batış saat açısıdır. δ Eşitlik 4.’te gösterildiği gibi (Cooper, 1969) eşitliği ile, güneş batış saat açısı (ω_s) ve eğik yüzeyin güneş batış saat açısı (ω_s') ise Eşitlik 5. ve Eşitlik 6.’daki ifadeler ile hesaplanır (Duffie ve Beckman, 1991):

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360(n+284)}{365} \right] \quad (4)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi)\tan(\delta)] \quad (5)$$

$$\omega'_s = \min\{\omega_s, \arccos[-\tan(\phi - \beta)\tan(\delta)]\} \quad (6)$$

Yatay yüzey üzerine gelen difüz ışınım (H_d) Eşitlik 7. ile hesaplanır (Page, 1961):

$$H_d = H(1.00 - 1.13K_T) \quad (7)$$

Burada K_T berraklık indeksidir ve Eşitlik 8. ile hesaplanır.

$$K_T = H/H_0 \quad (8)$$

Burada H_0 atmosfer dışındaki bir yatay yüzey üzerine gelen günlük toplam ışınım değeridir ve Eşitlik 9. ile hesaplanır (Duffie ve Beckman, 1991):

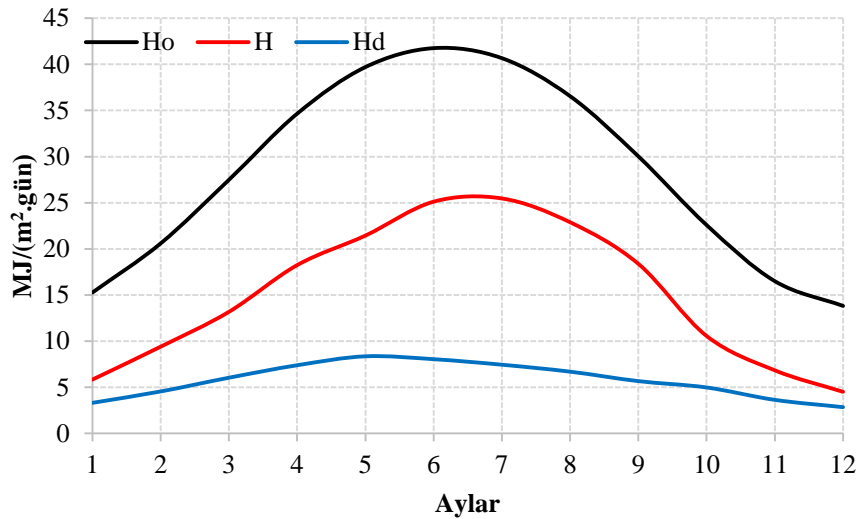
$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta\right) \quad (9)$$

Burada I_{sc} 1367 W/m² değerine sahip güneş sabitidir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

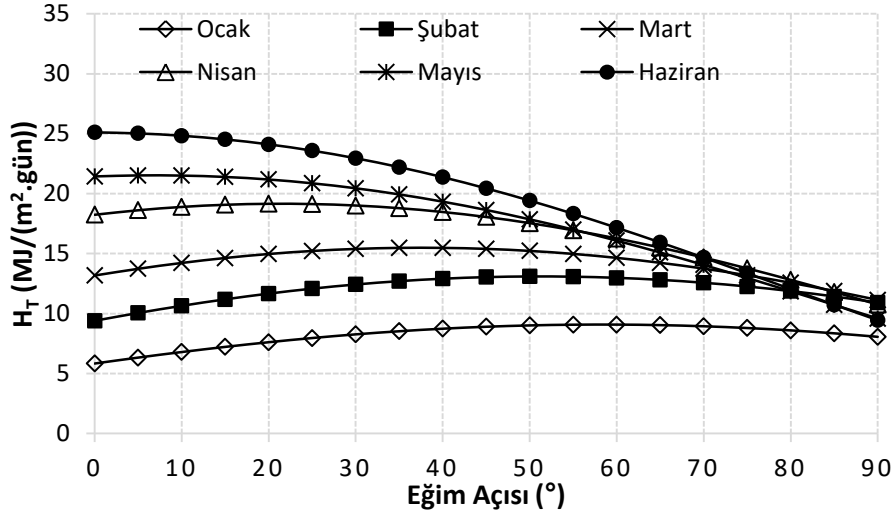
Bu çalışmada İğdır ilinde yürütülecek güneş enerjisi uygulamaları için panellerin hangi açıyla yerleştirilmesi durumunda en etkin bir şekilde güneş enerjisinden yararlanılabileceği araştırılmıştır. Bu nedenle eğik yüzeye gelen güneş radyasyonu (H_T) değerleri enlem açısına (ϕ), (belirtilen aylara göre) $\phi \pm 15^\circ$ açılara, mevsimlik ortalama optimum açılara ve aylık optimum açılara göre hesaplanmıştır. Ayrıca panellerin aylık optimum açılarla yerleştirilmesi durumunda elde edilen H_T değerleri diğer durumlarla elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Güneş panellerinin yatay konumda iken üzerlerine gelen atmosfer dışı güneş ışınımı (H_0) değerleri ve İğdır ili için aylık ortalama günlük toplam güneş ışınımı (H) değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Ayrıca difüz radyasyon (H_d) değerleri de ilgili şekilde verilmiştir. H değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün ölçüm değerleri olup H_0 ve H_d değerleri gerekli bağıntılarla hesaplanmıştır.

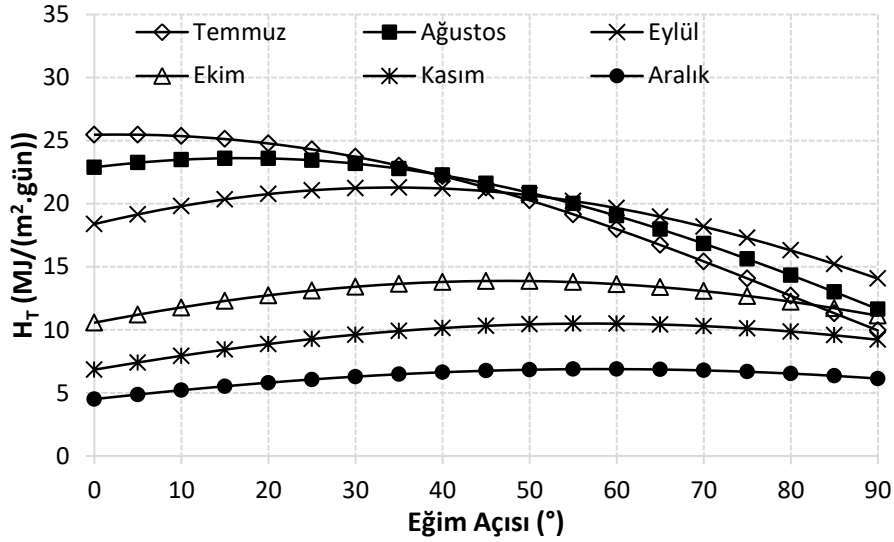


Şekil 3. İğdır İlinde Yatay Yüzeğe Gelen ve Atmosfer Dışı Güneş Radyasyonu ile Difüz Radyasyon Değerleri

Güneş radyasyonundan daha etkin bir şekilde yararlanmak için paneller belirli açılarla yerleştirilmelidir. Bu nedenle paneller genellikle sabit bir eğim açısında veya belirlenen optimum açılara göre yerleştirilirler. İğdır ili için eğimli yüzeye hangi açıda ne kadar güneş radyasyonu (H_T) geldiğini belirlemek için panel açısı 0° - 90° arasında 1° artımlarla değiştirilerek H_T değerleri hesaplanmıştır. Aylara göre H_T değerinin açıyla nasıl değiştiğinin daha iyi görülebilmesi için H_T değerleri 5° artımlarla hesaplanarak Şekil 4'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4. Iğdır İlinde Panel Eğim Açısına Göre H_T 'nin Değişimi: Ocak-Haziran İçin (a), Temmuz-Aralık İçin (b)

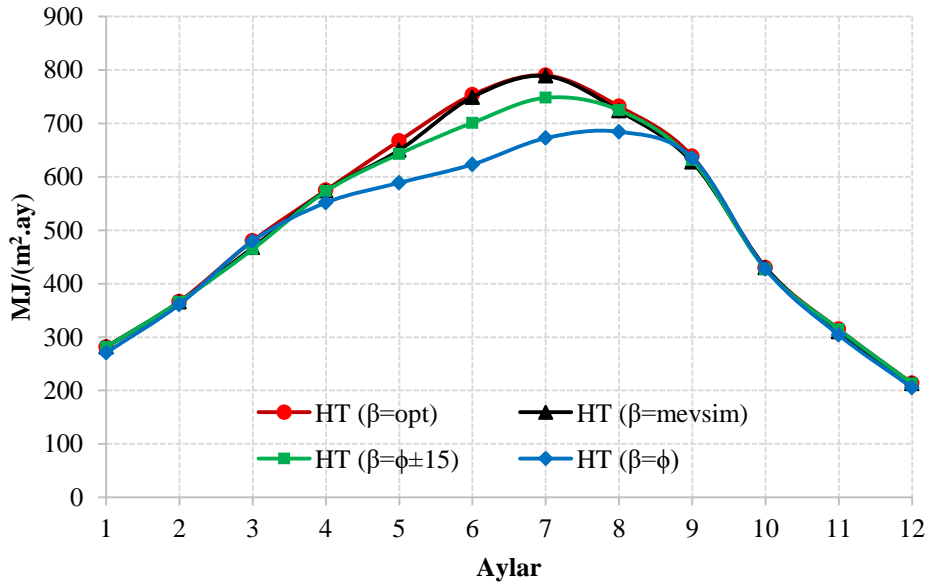
Şekil 4'ten Mayıs, Haziran ve Temmuz ayları için neredeyse 0° eğim açısında, yani paneller yatay konumlandırılmışken, en fazla güneş radyasyonuna maruz kaldığı görülmektedir. Diğer aylar için ise belli bir açı değerine kadar H_T 'de artış, daha sonra ise azalış olduğu ilgili şekilden açıkça anlaşılmaktadır. Her ay için eğim açısı 0° ile 90° arasında 1° artımlarla değiştirilirken maksimum H_T değerini veren açı değeri optimum açı (β_{opt}) olarak belirlenmiş ve bu açılar aylara göre Çizelge 1'de sunulmuştur. Çizelge 1'de gösterilen n değeri (1 Ocak'tan itibaren) bir aydaki toplam güneş radyasyonunun aylık ortalama değerine denk gelen o aydaki gün sayısını göstermektedir (Klein, 1977). Ayrıca, Iğdır ili için yatay yüzeye gelen (H), enlem açısına (ϕ) göre konumlandırılmış eğik yüzeye gelen ($H_T(\beta=\phi)$), Nisan-Eylül ayları için $\phi-15^\circ$ ve Ekim-Mart ayları için $\phi+15^\circ$ ile konumlandırılmış eğik yüzeye gelen ($H_T(\beta=\phi\pm 15)$), mevsimlik ortalama optimum açılara göre konumlandırılmış eğik yüzeye gelen ($H_T(\beta=mevsim)$) ve aylık optimum açılara göre konumlandırılmış eğik yüzeye gelen ($H_T(\beta=opt)$) aylık toplam güneş radyasyonu değerleri de ilgili çizelgede verilmiştir.

Çizelge 1. Iğdır İli İçin Sabit ve Değişken Açılı Bir Yüze Gelen Güneş Radyasyonu Değerleri

Aylar	n	β_{opt}	MJ/(m ² .ay)				
			H	$H_T(\beta=\phi)$	$H_T(\beta=\phi\pm 15)$	$H_T(\beta=mevsim)$	$H_T(\beta=opt)$
1	17	58	181.02	270.84	281.31	281.46	281.68
2	47	51	263.34	361.37	366.19	365.93	366.75
3	75	38	408.48	479.90	464.50	467.50	480.18
4	105	21	547.26	551.68	573.00	573.94	574.77
5	135	7	664.62	588.78	642.82	649.83	667.38
6	162	0	753.42	623.21	701.09	749.07	753.42
7	198	3	789.42	672.41	747.94	788.65	789.84
8	228	17	709.44	684.30	724.80	723.48	731.79
9	258	34	551.46	635.83	631.46	627.89	638.27
10	288	47	327.48	427.52	427.23	430.05	430.12
11	318	57	205.14	304.02	314.61	310.28	314.79
12	344	58	139.80	205.55	213.21	213.31	213.47
Toplam	MJ/(m².yıl)		5540.88	5805.41	6088.16	6181.39	6242.46

*n: Gün Sayısı, β : Eğim Açısı, ϕ : Enlem Açısı

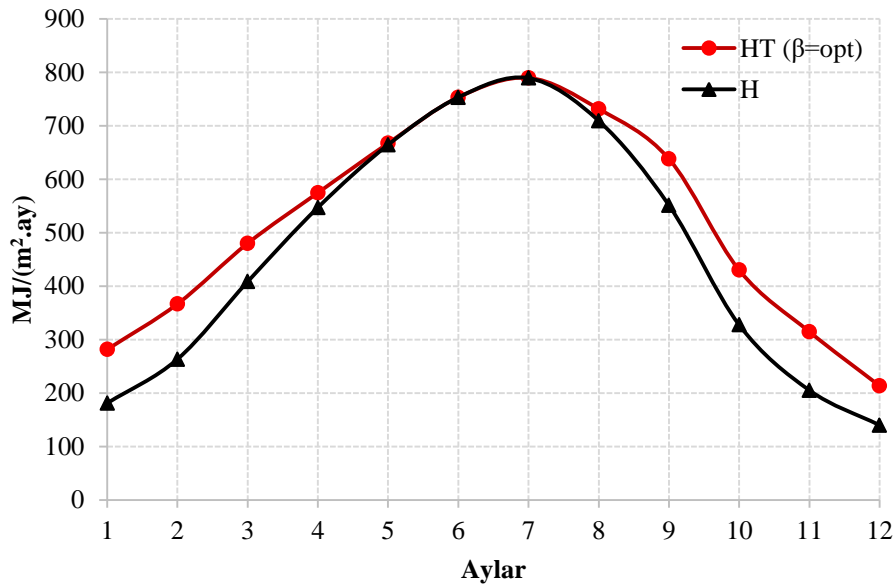
Çizelge 1'den panellerin, yıl boyunca yatay yerleştirilmesi durumunda toplam 5540.88 MJ/(m².yıl), eğim açısında (ϕ) yerleştirilmesi durumunda toplam 5805.41 MJ/(m².yıl), $\phi\pm 15^\circ$ ile yerleştirilmesi durumunda toplam 6088.16 MJ/(m².yıl), mevsimlere göre optimum açı ortalamasıyla yerleştirilmesi durumunda 6181.39 MJ/(m².yıl) ve aylık optimum açı ile yerleştirilmesi durumunda ise 6242.46 MJ/(m².yıl) değerinde bir güneş radyasyonuna maruz kalacağı görülmektedir. Çizelge 1'de farklı açılara göre aylık olarak verilen H_T değerleri Şekil 5'te görselleştirilmiştir.

Şekil 5. Farklı Eğim Açılarına Göre H_T Değerleri

Şekil 5'te Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Eylül, Ekim, Kasım ve Aralık ayları için panellerin farklı açı değerine göre konumlandırılmasının yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Bu aylar için belirtilen açılarla elde edilen H_T değerleri arasındaki farklar Çizelge 1'den detaylı bir şekilde incelenebilir. Ancak enlem açısına (ϕ) ve $\phi\pm 15^\circ$ ile yerleştirilen panellerin özellikle Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında önemli miktarda bir enerjiden yararlanmadığı ilgili şekilden açıkça görülmektedir. Çizelge 1 ve Şekil 5'ten anlaşılacağı gibi paneller üzerine gelen toplam güneş radyasyonu miktarı panellerin aylık optimum açı ile yerleştirilmesi durumunda elde edilebilmektedir.

Şekil 6'da panellerin yıl boyunca yatay yerleştirilmesi durumunda üzerine gelen güneş radyasyonu değeri ile aylık optimum açılara göre yerleştirilmesi durumları karşılaştırılmıştır. Panellerin Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında aylık optimum açı değerleri sırasıyla 7° , 0° ve 3°

olduğundan yatay konumla hemen hemen benzer radyasyon değerlerine sahiptir. Ancak diğer aylarda optimum açıyla yerleştirilmesinin yatay konuma göre önemli miktarda enerji kazancı sağlayacağı da ilgili şekilden açıkça görülmektedir.



Şekil 6. Panellerin Yatay ve Aylık Optimum Açılara Göre Yerleştirilmesi Durumunda Üzerine Gelen Güneş Radyasyonu Miktarı

Panellerin aylık optimum açı ile yerleştirilmesi durumunda ne kadar enerji kazancı sağlanacağı da Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Panellerin Aylık Optimum Açı ile Yerleştirilmesi Durumundaki Enerji Kazancı (%)

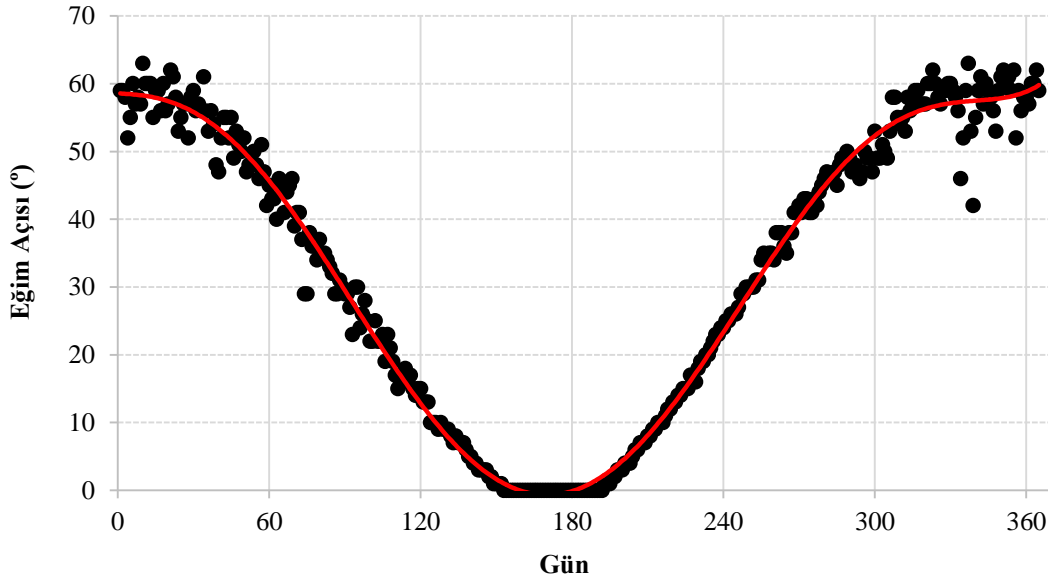
	Aylar											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H	55.61	39.27	17.55	5.03	0.42	0.00	0.05	3.15	15.74	31.34	53.45	52.70
H_T (β=φ)	4.00	1.49	0.06	4.18	13.35	20.89	17.46	6.94	0.38	0.61	3.54	3.85
H_T (β= φ±15)	0.13	0.15	3.38	0.31	3.82	7.46	5.60	0.96	1.08	0.68	0.06	0.13
H_T (β=mevsim)	0.08	0.23	2.71	0.15	2.70	0.58	0.15	1.15	1.65	0.02	1.46	0.08

β: Eğim Açısı, φ: Enlem Açısı

Çizelge 2 panellerin aylık optimum açı ile yerleştirilmesi durumundaki en yüksek kazancın yatay yüzeyle karşılaştırıldığında %55.61 ile Ocak ayında elde edilebileceğini ve en düşük kazancın da mevsimlik ortalama açıyla karşılaştırıldığında %0.02 ile Ekim ayında elde edileceğini göstermektedir. Ayrıca Haziran ayı için hesaplanan optimum açı değeri 0° olduğundan yatay düzleme göre herhangi bir kazanç olmadığı da ilgili çizelgeden görülmektedir.

Yılın günlerine göre optimum panel eğim açılarının değişimi Şekil 7'de, günlük ve aylık optimum açılara göre elde edilen enerji miktarları da Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Şekil 7'de optimum eğim açılarının özellikle Ocak-Şubat ve Kasım-Aralık aylarında günlük olarak çok değiştiği ancak grafik üzerinde kırmızı çizgi ile gösterildiği gibi de bir eğilimin olduğu da görülmektedir. Bu değişimin temel sebebi İğdır ili için Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan günlük güneş radyasyonu değerlerindeki değişimdir. Hava durumunda meydana gelen farklılık (özellikle bulutluluk miktarı) art arda gelen günler arasında radyasyon miktarında belirgin bir değişikliğe sebep olmuş ve bu değişim de optimum eğim açılarında Şekil 7'deki gibi değişime neden olmuştur.



Şekil 7. Yılın Günlerine Göre Optimum Panel Eğim Açılarının Değişimi

Panellerin günlük ve aylık optimum açılara göre yerleştirilmesi durumunda elde edilen enerji miktarları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Panellerin Günlük ve Aylık Optimum Açılara Göre Yerleştirilmesi Durumunda Enerji Miktarları

H_T (β =günlük optimum)	6296.56 MJ/(m ² .yıl)
H_T (β =aylık optimum)	6242.46 MJ/(m ² .yıl)
Fark	0.86 (%)

Panellerin günlük optimum açılara göre yerleştirilmesi durumunda aylık optimum açılara kıyasla sadece %0.86'lık bir enerji kazancı sağlanacağı ilgili çizelgeden görülmektedir.

SONUÇ

Güneş panelleri çoğunlukla sabit açı ile yerleştirilmekte ve bu açı da genellikle ya enlem açısı olmakta ya da enlem açısına yakın olacak şekilde seçilmektedir. Ancak panel açısının değiştirilebilir olması güneş enerjisinden daha etkin bir şekilde yararlanmayı sağlar. İğdır ilinde gerçekleştirilecek güneş enerjisi uygulamaları için aylık optimum panel açılarının belirlendiği bu çalışmada optimum açılar Ocak ve Aralık ayları için 58°, Haziran ayı için ise 0° olarak bulunmuştur. Diğer aylar ise 0° ile 58° arasında değişmektedir. Aylık optimum açılara göre panellerin konumlandırılması diğer tüm durumlara göre enerji kazancı sağlamıştır. Enlem açısına (ϕ) göre yerleştirilme durumuna kıyasla aylık optimum açı ile Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında sırasıyla %13.35, %20.89 ve %17.46'lık bir enerji kazancı sağlanmıştır. Altı aylık dönemlere göre ($\phi \pm 15$ olacak şekilde) yerleştirilme durumuna kıyasla yine Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında sırasıyla %3.82, %7.46 ve %5.60 oranında bir enerji kazancı sağlanmıştır. Ay bazında optimum açı hesabına yaklaştığı için mevsimlik ortalama optimum açılara göre yerleştirilen panellerden yıl boyunca elde edilen kazanç diğer durumlara göre daha azdır. Bu durumda da en yüksek kazanç Mart ve Mayıs aylarında sırasıyla %2.71 ve %2.70 olarak elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazar global güneş radyasyonu ve güneşlenme süresi verilerini sağladığı için Meteoroloji Genel Müdürlüğüne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Abed, F. ve Al-Salami, Q. H. (2021). Calculate the best slope angle of photovoltaic panels theoretically in all cities in Turkey. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(10), 9639–9654. doi:10.1007/s13762-021-03797-y
- Anonim. (2023a). T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı/Meteoroloji Genel Müdürlüğü. URL: <https://www.mgm.gov.tr/kurumici/turkiye-guneslenme-suresi.aspx?l=tg> (Erişim tarihi: Mayıs 25, 2023).
- Anonim. (2023b). T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı/ Meteoroloji Genel Müdürlüğü. URL: https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx?il=igdir (Erişim tarihi: Mayıs 25, 2023).
- Bakirci, K. (2012a). 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. doi:10.1080/15567031003735279
- Bakirci, K. (2012b). General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6149–6159. doi:10.1016/j.rser.2012.07.009
- Conceição, R., Silva, H. G., Fialho, L., Lopes, F. M. ve Collares-Pereira, M. (2019). PV system design with the effect of soiling on the optimum tilt angle. *Renewable Energy*, 133, 787–796. doi:10.1016/j.renene.2018.10.080
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12(3), 333–346. doi:10.1016/0038-092x(69)90047-4
- Duffie, J. A. ve Beckman, W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, NY: Wiley.
- Jacobson, M. Z. ve Jadhav, V. (2018). World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. *Solar Energy*, 169, 55–66. doi:10.1016/j.solener.2018.04.030
- Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y. ve Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in SANLIURFA, Turkey. *Renewable Energy*, 29(8), 1265–1275. doi:10.1016/j.renene.2003.12.014
- Klein, S. A. (1977). Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 19(4), 325–329. doi:10.1016/0038-092x(77)90001-9
- Liu, B. Y. H. ve Jordan, R. C. (1960). The Interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4(3), 1–19. doi:10.1016/0038-092x(60)90062-1
- Liu, B. Y. H. ve Jordan, R. C. (1962). Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, 67, 526-541.
- Page, J. K. (1961). The Estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surface from sunshine records for latitude 40°N to 40°S. *Proceedings of the UN Conference on New Sources of Energy*, 4, 378-390
- Shaker Al-Sayyab, A. K., Al Tmari, Z. Y. ve Taher, M. K. (2019). Theoretical and experimental investigation of photovoltaic cell performance, with optimum tilted angle: Basra City Case Study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100421. doi:10.1016/j.csite.2019.100421
- Şahin, M. (2019). Determining optimum tilt angles of photovoltaic panels by using artificial neural networks in Turkey. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 26(3). doi:10.17559/tv-20160702220418
- Ulgen, K. (2006). Optimum tilt angle for solar collectors. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28(13), 1171–1180. doi:10.1080/00908310600584524