



Dönemsel optimum eğim açısıyla güneş enerji kazancında enlem, rakım ve karın etkisinin dört il örneğiyle incelenmesi

Kutbay Sezen^a

^aAlanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, ALTSO Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji, Antalya, 07425, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 7 Ağustos 2024

Düzeltilme 12 Ekim 2024

Kabul 30 Ekim 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Güneş ışıması

Dönemsel optimum eğim açısı

Güneş paneli

Enlem

Rakım

Kar

Optimum dönem ayları

ÖZET

Güneş panellerin topladığı güneş enerjisi eğim açılarının belirli dönemler halinde optimize edilmesiyle artırılabilir. Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde, yıllık dönemsel optimum eğim açısı kullanılarak güneş enerjisi kazancında, enlem, rakım ve kar örtüsünün etkileri incelenmiştir. Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri illeri, enlem, yüksek rakım ve kar örtüsünün etkilerini karşılaştırmaya olanak sağlayan coğrafi ve iklimsel özelliklere sahip iller olarak seçilmiştir. Her il için 1, 2, 3 ve 4 dönemli optimum eğim açısı dönem başlangıç ve bitiş ayları manuel olarak değiştirilerek yıllık maksimum güneş enerji kazancı sağlanacak şekilde belirlenmiştir. Sonuçlar, yılın iki eğim açısı dönemine ayrılmasının her il için en büyük kazancı sağladığını, üç ve dört dönemli ayırmaların ek getirisinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Örneğin, Bursa'da iki, üç ve dört eğim açısı dönemi seçimi yıllık güneş ışımasında sırasıyla %4,54, %4,79 ve %5,26 kazanç sağlamaktadır. Dönemsel optimum açı seçiminin karlı bölgelerde daha fazla fayda sağladığı görülmüştür. Kar örtüsünün uzun sürdüğü Erzurum ve Hakkâri'de, yüksek eğim açılı dönemlerin 6 ay tutulması, kar yağışının az olduğu Antalya ve Bursa'da ise 7 ay tutulması daha yüksek güneş ışıması kazancı sağlamaktadır. Dört dönemli uygulamada, bahar ve sonbahar dönemlerinin Bursa, Antalya ve Hakkâri için ikişer ay seçilmesi avantajlıdır. Sonuç olarak, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak için her ilin coğrafi ve iklimsel özelliklerine göre optimum eğim açısı ve dönem değişimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde güneş enerjisinden maksimum fayda sağlanmasını mümkün kılacaktır.

Investigation of the effects of latitude, altitude, and snow on solar energy gain with periodic optimum tilt angle using four province examples

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 August 2024

Received in revised form 12 October 2024

Accepted 30 October 2024

Available online

Keywords:

Solar radiation

Solar panel

Seasonal optimum tilt angle

Latitude

Altitude

Snow

Optimum period months

ABSTRACT

Solar energy gain of solar panels can be increased by optimizing the tilt angles periodically. This study examines the periodic optimal tilt angle changes to maximize total solar radiation on inclined surfaces in four different provinces of Turkey: Bursa, Erzurum, Antalya, and Hakkari. These provinces were selected to examine the effects of latitude, high altitude, and snow cover. Monthly and annual total solar radiation incident on a horizontal surface was calculated for 1, 2, 3, and 4 optimal tilt angle periods for each province. Period durations were adjusted to maximize gains in each province rather than being of equal length. Results indicate that dividing the year into two tilt angle periods provides the greatest gains for each province, while the additional gains from three and four periods are limited. For instance, in Bursa, selecting two, three, and four tilt angle periods yields annual solar radiation gains of 4.54%, 4.79%, and 5.26%, respectively. The study shows that selecting the optimal seasonal angle in snowy regions provides greater benefits. In Erzurum and Hakkari, where snow cover is prolonged, maintaining high tilt angles for six months is beneficial, while in Antalya and Bursa, with minimal snowfall, seven months of high tilt angles yield better results. In the four-period application, selecting two months each for spring and autumn in Bursa, Antalya, and Hakkari is advantageous. In conclusion, enhancing the efficiency of solar energy systems requires determining optimal tilt angles and periods based on the geographical and climatic characteristics of each province. This approach will maximize the benefits of solar energy in Turkey's diverse regions.

I. GİRİŞ

Güneş enerjisi, sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Fosil yakıtların tükenme riski ve çevresel sorunların artması, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır [1]. Güneş enerjisi, çevre dostu ve tükenmeyen bir kaynak olarak öne çıkmakta ve bu nedenle birçok ülkenin enerji politikalarında büyük önem taşımaktadır [2]. Türkiye, coğrafi konumu sayesinde güneş enerjisi yüksek potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır [3]. Ülkenin farklı bölgelerinde bulunan çeşitli iklim koşulları ve coğrafi özellikler ise güneş enerjisi verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

Güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği, güneş panellerinin doğru konumlandırılması ve eğim açısının optimize edilmesi ile artırılabilir [4]. Eğim açısının optimize edilmesi, güneş ışınımından maksimum düzeyde faydalanmayı sağlar. Bu bağlamda, her bölgenin kendine özgü iklim ve coğrafi özellikleri göz önünde bulundurularak, optimum eğim açısı belirlenmelidir. Türkiye'nin farklı bölgelerinde yapılan araştırmalar, eğim açısının optimizasyonunun, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Atlım vd. [5] Balıkesir'de yaptığı çalışmada, farklı eğim açılarıyla yerleştirilmiş güneş panellerinin verimlilikleri karşılaştırılmış ve panel eğim açılarının doğru seçilmesi durumunda yıllık enerji üretiminde büyük kazançlar elde edildiği belirlenmiştir. Bakırcı [6], Ardahan ilinde yaptığı çalışmada yüzey eğimlerinin güneş enerjisi potansiyeline etkisini incelemiş ve optimum eğimli yüzeylerde %17'ye varan verim artışı sağlandığını ortaya koymuştur. Çağlar [7], farklı derece-gün bölgelerinde optimum eğim açısının belirlenmesi üzerine çalışmış ve yılın her ayında optimum eğim açılarını teorik hesaplamalarla tespit etmiştir. Dal [8] çalışmasında, Kayseri'de güneş enerji panellerindeki optimum eğim açısının verime etkisini incelemiş ve aylık optimum eğim açısı ile konumlandırmanın büyük avantaj sağladığını göstermiştir. Aynı yazarın [9] yat limanlarındaki güneş enerji santralleri üzerine yaptığı çalışmada ise, aylık optimum eğim açılarının değiştirilmesi ile üretim veriminin artırılacağı belirlenmiştir. Güner [10], Iğdır ilinde güneş enerjisi uygulamaları için yaptığı çalışmada, panellerin aylık optimum açıları ile yerleştirilmesinin diğer yöntemlere göre daha fazla güneş radyasyonu elde edilmesini sağladığını göstermiştir.

Kaba vd. [11], Erzincan'da yaptıkları çalışmada, güneş kolektörlerinin enerji ve ekserji analizleri yapılmış ve optimum eğim açılarında yüksek verim sağlandığı belirlenmiştir. Koçer vd. [12], Ankara ve ilçeleri için güneş kolektörü optimum eğim açısını belirlemiş ve ayda bir veya yılda en az iki kez eğim açısının ayarlanmasını tavsiye etmişlerdir. Yağlı ve Koç [13], Gaziantep bölgesinde güneş panellerinin optimum eğim açılarının belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, optimum açının 31° olduğunu ve bu açının enerji üretimini maksimize ettiğini ortaya koymuşlardır. Yücel vd. [14], güneş takip sistemiyle çalışan panellerin sulama uygulamalarında verimlilik düzeylerini incelemiş ve iki eksenli güneş takip sisteminin verimliliği artırarak enerji üretiminde %23 oranında katkı sağladığını göstermiştir. Arslan ve Türkdoğan'a ait çalışmada [15], Yalova ilindeki kamu binalarının çatılarında kurulabilecek güneş enerji santralleri ile enerji üretim potansiyelinin ne kadarının karşılanabileceği incelenmiştir. Ayrıca, mevcut potansiyelin artırılması için mimari planların tasarım aşamasında nasıl değiştirilebileceği ve mimari optimizasyon ile enerji üretim miktarlarının ne oranda artabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı enleme, rakıma ve kar örtüsü süresine sahip dört ili (Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri) için dönemsel optimum eğim açısı seçimi ile güneş enerji kazanımı incelenmiştir. Bu dört il için 1, 2, 3 ve 4 dönemli optimum eğim açısı seçiminde yatay yüzeye gelen aylık ve yıllık toplam güneş ışınımı değerleri geliştirilen model ve iteratif çözüm ile bulunmuştur. Ayrıca, dönemlerin en yüksek kazanç için hangi illerde hangi

aylardan oluşması gerektiği tespit edilmiştir. İncelenen iller arasında Bursa ve Erzurum kuzey illeri olarak benzer enlemlerde, Antalya ve Hakkâri ise güney illeri olarak benzer enlemlerdedir. Fakat benzer enlemdaki iller rakım ve kar örtüsü açısından farklılaşmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde, yıllık dönemsel optimum eğim açısı kullanılarak güneş enerjisi kazancında enlem, rakım ve kar örtüsünün etkilerini incelemektir. Enlem, rakım ve kar örtüsü süresi temel değişkenler olarak ele alınmış olup, seçilen dört il, bu parametrelerin optimum eğim açısına ve eğim açısı değişim periyoduna etkilerini karşılaştırmaya olanak sağlayan coğrafi ve iklimsel özelliklere sahiptir. Literatürde, benzer coğrafi ve iklimsel koşullara sahip illerde dönemsel optimum eğim açısı çalışmaları bulunmakla birlikte, enlem ve kar örtüsü açısından farklılık gösteren dört ilin birlikte değerlendirildiği bir karşılaştırma henüz gerçekleştirilmemiştir. Bu yaklaşım, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde güneş enerjisinden minimum kontrol ile maksimum fayda sağlanması açısından yol gösterici olacaktır.

II. TEORİK METOD

2.1 Eğik yüzeye gelen ışınım hesabı

Bir bölgede belirli periyotlarla değişen eğim açısındaki eğik düzleme düşen yıllık toplam güneş ışınımı, ayın ortalama gün değerine göre yapılan hesaplamalar ile aylık ışınımın ve bunların toplamı ile yıllık toplam ışınımın bulunması ile belirlenebilir. Bu çalışmada Liu ve Jordan [16, 17] tarafından geliştirilen matematiksel modellerden ve Yiğit ve Atmaca [18] tarafından derlenen ampirik eşitliklerden faydalanılmıştır. MS-Excel programının Solver eklentisinin iteratif çözüm kabiliyeti modele uygulanarak, en yüksek dönemsel güneş ışınımını veren optimum eğim açısı sayısal olarak hesaplanmıştır.

Eğik düzleme düşen günlük güneş ışınımı H_T , yatay düzleme düşen günlük güneş ışınımına H , H ışınımının direkt H_b ve yayılı H_d bileşenlerine, eğik düzlemin eğim açısına β , eğik ve yatay düzleme düşen direkt ışınım oranına \bar{R}_b ve yansıtma oranına ρ bağlı olarak Eş. 1'de ifade edilmiştir.

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

Yatay düzleme düşen toplam günlük güneş ışınımı H , yılın o günü için o bölgede atmosfer dışında yatay düzleme düşen güneş ışınımına H_o ve berraklık endeksi K_T 'ye bağlı olarak Eş. 2 ile hesaplanabilir.

$$H = K_T \cdot H_o \quad (2)$$

Atmosfer dışında yatay düzleme düşen güneş ışınımı H_o bölgenin enlem açısına ϕ , yılın gününe d bağlı değişen deklinasyon açısına δ ve bu iki açının bir bileşeni olan güneş batış açısına ω_s bağlı olarak Eş. 3 ile belirlenir. Eş.3'teki G_{sc} güneş sabitidir, atmosfer dışında yatay düzleme düşen güneş ışınım şiddeti olan 1367 W/m^2 olarak alınır.

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360d}{365}\right) \right] \cdot \left[\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin\phi \sin\delta \right] \quad (3)$$

Deklınasyon açısı δ Eş. 4 ile hesaplanabilir ve d değeri ayın ortalama gün değeri olarak alınabilir.

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+d}{365}\right) \quad (4)$$

Berraklık endeksi K_T ise a ve b bölgesel sabitlerine ve izafi güneşlenme süresine n/N bağı olarak Eş. 5 ile hesaplanır.

$$K_T = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

a ve b bölgesel sabitleri enlem açısına ϕ , deklınasyon açısına δ ve rakıma Z bağı olarak sırasıyla, Eş. 6 ve Eş. 7 ile hesaplanır.

$$a = 0,103 + 0,000017Z + 0,198 \cos(\phi - \delta) \quad (6)$$

$$b = 0,533 - 0,165 \cos(\phi - \delta) \quad (7)$$

İzafi güneşlenme süresine n/N bölgenin çevre şartlarına bağı gerçek günlük güneşlenme süresinin n gün uzunluğuna N oranıdır. Günlük güneşlenme süresi n ölçüme dayalı verilerdir ve MGM tarafından her il için paylaşılmıştır [19].

Gün uzunluğu N değeri güneş batış açısına ω_s bağı olarak Eş. 8 ile hesaplanır.

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (8)$$

Güneş batış açısı ω_s Eş. 9 ile hesaplanabilir.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \quad (9)$$

Yatay düzleme düşen güneş ışınımının direkt H_b ve yayılı H_d bileşenleri ise Eş. 10 ve Eş. 11 ile belirlenebilir.

$$H = H_d + H_b \quad (10)$$

$$\frac{H_d}{H} = 1 - 1,13K_T \quad (11)$$

Eğik ve yatay düzleme düşen direkt ışınım oranı \bar{R}_b ise enlem açısına ϕ , deklinasyon açısına δ , güneş batış açısına ω_s ve ayın ortalama gününde güneşin eğik yüzeye ilk düşüş saat açısına ω_s' bağlı olarak Eş. 12 ile hesaplanır.

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi-\beta)\cos\delta\sin\omega_s'+(\pi/180)\omega_s'\sin(\phi-\beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\cos\omega_s+(\pi/180)\omega_s\sin\phi\sin\delta} \quad (12)$$

ω_s' değeri Eş. 13'e göre belirlenir.

$$\omega_s' = \min \left[\begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan\phi\tan\delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi-\beta)\tan\delta) \end{array} \right] \quad (13)$$

Yansıtma oranı ρ , çevredeki binalar yeryüzü şekilleri gibi çevresel faktörlere göre değişmekle beraber, karlı günler için 0,7 diğer zamanlar için 0,2 alınabilir [18].

2.2 Çözüm prosedürü

Bölüm 2.1'de açıklanan matematiksel eşitlikler ile eğik yüzeye gelen günlük toplam güneş ışınım değeri hesaplanabilir. Gün değeri o ayın ortalama gün değeri olarak alınırsa o ayın ortalama günlük değeri bulunabilir ve buradan aylık değeri ve ayların toplamı ile yıllık toplam ışınım değeri belirlenebilir.

Eğik yüzeye gelen toplam güneş ışınımı bölgeye ait girdi parametrelerine ve eğik yüzeyin eğim açısına bağlıdır. Burada kurulum sonrası değiştirilebilecek tek değişken eğim açısıdır. Yüzeyin eğim açısının yıl içinde dönemler halinde optimum değişimi o dönem için en yüksek güneş ışınımı kazanımını sağlayabilir. Bu çalışmada, her il için yılın 1,2,3 ve 4 dönem olarak optimum açı ve en uygun aralıklarla bölünmesi amaçlanmıştır. Her dönem için maksimum enerji kazancını sağlayan optimum panel eğim açısı hesaplanmıştır. Panelin eğim açısının değiştirilmediği aylar dönemi oluşturur. Kar örtüsünün bulunduğu aylarda yansıtma oranı ρ 0,2, diğer aylarda 0,7 alınarak karlılık parametresinin etkisi eğik düzleme düşen günlük güneş ışınımı H_T hesabına Eş. 1'de dahil edilmiştir. Bölüm 2.1'de belirtilen eşitliklerle MS-Excel programında oluşturulan modelde, Solver eklentisi yardımı ile en yüksek dönemsel ışınım kazanımını sağlayan eğim açıları iteratif olarak çözümlenerek bulunmuştur. Dönem başlangıç ve bitiş ayları manuel olarak değiştirilerek uygun dönem uzunlukları yine maksimum güneş enerji kazancı için belirlenmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Türkiye’de enlem, rakım ve kar örtüsünün süresi açısından farklılık arz eden dört il (Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri) belirlenmiş ve bu iller için 1, 2, 3 ve 4 dönemli optimum eğim açısı seçiminde yatay yüzeye gelen aylık ve yıllık toplam güneş ışınımı değerleri bulunmuştur. Ayrıca dönemlerin en yüksek kazanç için hangi illerde hangi aylardan oluşması gerektiği tespit edilmiştir. Modelin kurulması için gerekli olan, incelenen illere ait aylık ortalama güneşlenme süreleri Tablo 1’de, enlem, rakım ve kar örtüsünün bulunduğu aylar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Dört ilin aylık ortalama güneşlenme süreleri n (h) [19]

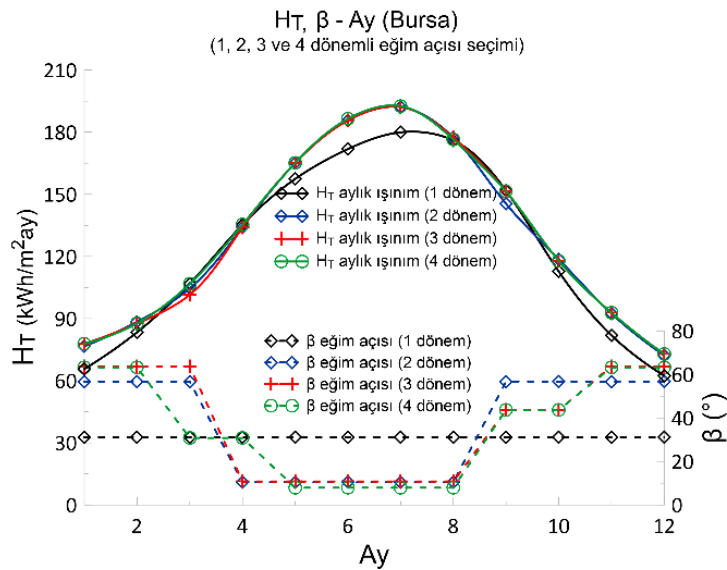
İl/Ay	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haz.	Tem.	Ağus.	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Bursa	2,8	3,4	4,2	5,8	7,8	9,7	10,7	10	7,9	5,5	4	2,9
Erzurum	3,4	4,4	5,2	6,3	7,9	10,2	11,3	10,7	9,1	6,9	4,9	3,2
Antalya	5,1	5,8	6,7	8,0	9,8	11,4	11,8	11,3	9,8	7,9	6,3	4,9
Hakkari	4,1	5,3	5,7	6,6	8,8	11,6	12,2	11,3	10	7,2	5,3	3,8

Tablo 2. Dört ilin enlem, rakım ve karlı ayları [18, 19]

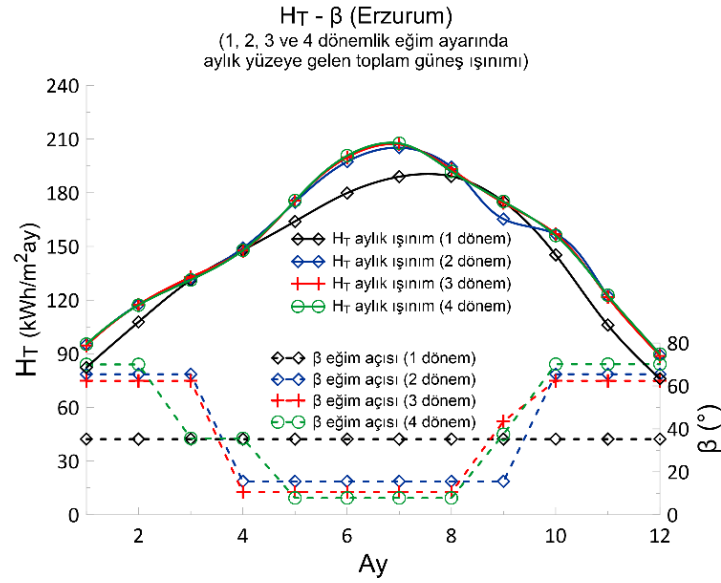
İl	ϕ - Enlem ($^{\circ}$)	Z - Rakım (m)	Karlı aylar
Bursa	40,21	100	Ocak
Erzurum	39,94	1758	Ekim, Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart
Antalya	36,91	42	-
Hakkari	37,41	1950	Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart

Bursa ve Erzurum kuzey illeri olarak benzer enlemlerde, Antalya ve Hakkâri ise güney illeri olarak benzer enlemlerdedir. Fakat Erzurum ve Hakkâri rakım ve karlı dönem açısından Bursa ve Antalya’dan farklılaşmaktadır. Seçilen illerin enlem, rakım ve kar durumu açısından farklılıkları, toplanan enerjideki kazanç açısından bu etkenlerin kıyaslanmasına olanak tanımıştır

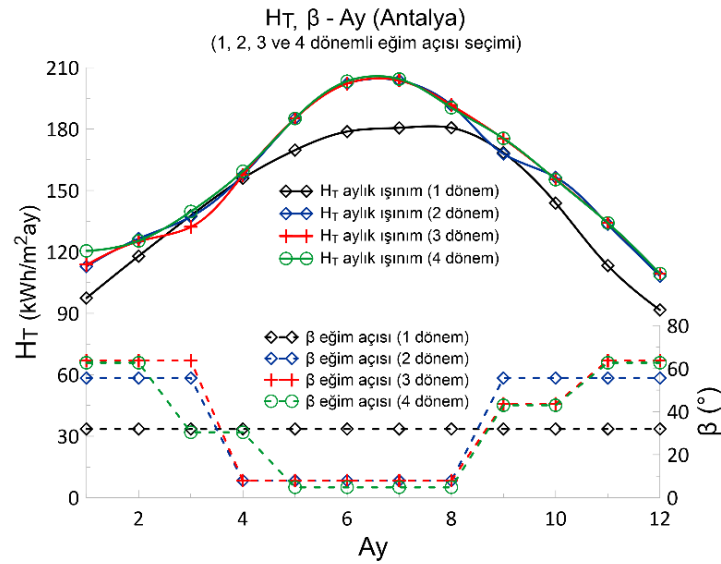
Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri illerine ait, belirlenen optimum açılı eğik yüzeye gelen aylık toplam güneş ışınımı değişimleri, 1, 2, 3 ve 4 dönemli eğim açısı seçimi durumu için belirlenmiş ve sırasıyla Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir.



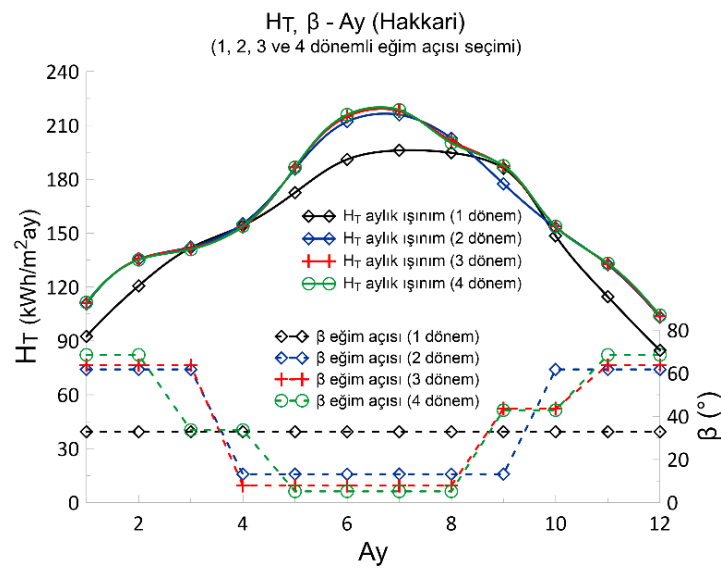
Şekil 1. Bursa ili aylık güneş ışınımı değerinin dönem sayısına göre değişimi, dönem ayları ve eğim açıları β



Şekil 2. Erzurum ili aylık güneş ışınımı değerinin dönem sayısına göre değişimi, dönem ayları ve eğim açıları β



Şekil 3. Antalya ili aylık güneş ışınımı değerinin dönem sayısına göre değişimi, dönem ayları ve eğim açıları β



Şekil 4. Hakkâri ili aylık güneş ışınımı değerinin dönem sayısına göre değişimi, dönem ayları ve eğim açıları β

İller için optimum açı dönemleri, dönem başlangıç ve bitiş aylarının manuel olarak değiştirilerek yıllık maksimum güneş enerji kazancı sağlanacak şekilde belirlenmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4'te sırasıyla, dört il için iki ve dört dönemli optimum eğim açısı seçiminde en yüksek kazancı sağlayan dönem ile standart mevsimsel dönemin karşılaştırması yapılmıştır. Dönem ayları numara ile belirtilmiştir. Standart dört dönem kış, bahar, yaz ve sonbaharın üçer aylık dönemler, standart iki dönem ise nisan ile ekim ayları arası altışar aylık dönemlerdir. Bu çerçevede, yılın dönemlere bölümünde tek bir standart oluşturmaktansa, o il özelinde maksimum kazanç hesabının yapılarak gerekirse dönemi uzatıp kısaltmak ve başlangıç bitiş aylarını değiştirmek enerji kazanımını artırıcı bir unsur olarak ortaya konulmuştur. Kar örtüsünün uzun süre kaldığı Erzurum ve Hakkâri illerinde iki dönemlik uygulamada, yüksek eğim açılı döneminin 6 ay tutulması, kar yağışın olmadığı veya çok az olduğu Antalya ve Bursa illerinde ise 7 ay tutulması daha yüksek güneş ışınım kazanımı sağlamaktadır. Yüksek eğim açılı döneminin kısaltılması optimum eğim açısı değerini de arttırmaktadır. Benzer enlemlerde olmalarına rağmen, 7 aylık yüksek eğim açılı döneme sahip Antalya'da kışlık optimum eğim açısı $55,6^\circ$ iken, kar örtüsünün olduğu ve bu nedenle 6 aylık yüksek eğim açılı dönem seçilen Hakkâri'de eğim açısı $61,8^\circ$ 'dir. Bu eğim açısı artışı aynı zamanda güneş panelleri üzerinde kar birikimini de engeller.

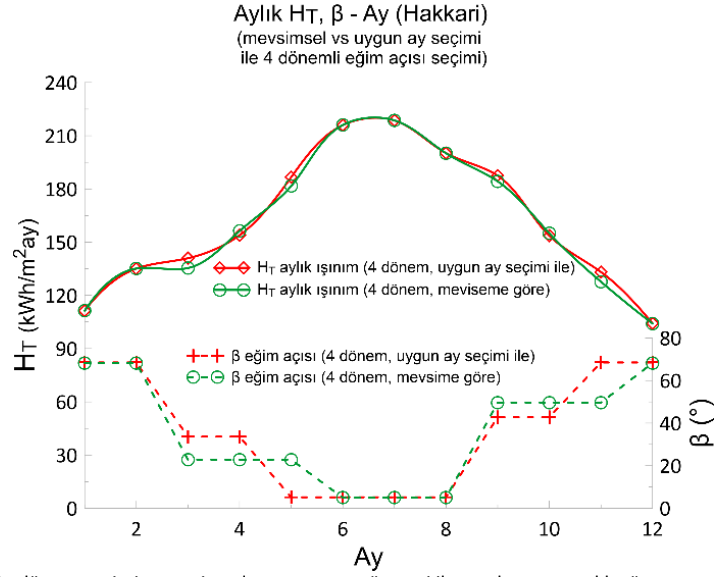
Tablo 3. Dört il için iki dönemli optimum eğim açısı seçiminde en yüksek kazancı sağlayan dönem ile standart mevsimsel dönemin karşılaştırması

İl	Dönem seçimi	Dönem ayları	Dönem eğim açıları ($^\circ$)	H_T (MJ/m ² yıl)
Bursa	En yüksek kazanca göre	4, 5, 6, 7, 8 / 9, 10, 11, 12, 1, 2, 3	56,7 / 10,5	1552,6
	Standart mevsimsel	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	56,7 / 15,1	1549,7
Erzurum	En yüksek kazanca göre	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	65,5 / 15,6	1799,2
	Standart mevsimsel	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	65,5 / 15,6	1799,2
Antalya	En yüksek kazanca göre	4, 5, 6, 7, 8 / 9, 10, 11, 12, 1, 2, 3	55,6 / 7,9	1882,6
	Standart mevsimsel	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	55,3 / 12,5	1824,4
Hakkâri	En yüksek kazanca göre	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	61,6 / 13,1	1924,7
	Standart mevsimsel	4, 5, 6, 7, 8, 9 / 10, 11, 12, 1, 2, 3	61,6 / 13,1	1924,7

Tablo 4. Dört il için dört dönemli optimum eğim açısı seçiminde en yüksek kazancı sağlayan dönem ile standart mevsimsel dönemin karşılaştırması

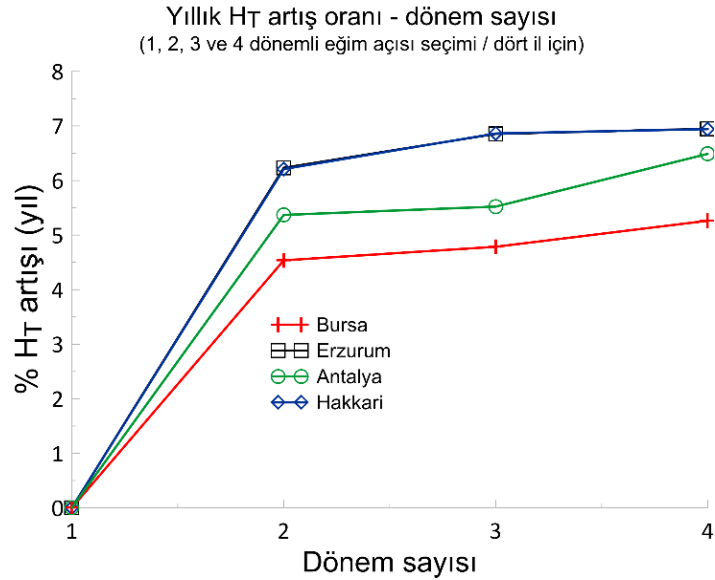
İl	Dönem seçimi	Dönem ayları	Dönem eğim açıları ($^\circ$)	H_T (MJ/m ² yıl)
Bursa	En yüksek kazanca göre	11,12,1,2 / 3,4 / 5,6,7,8 / 9,10	63,2 / 30,8 / 7,9 / 43,7	1563,4
	Standart mevsimsel	12,1,2 / 3,4,5 / 6,7,8 / 9,10,11	63,4 / 22,2 / 7,9 / 48,7	1555,7
Erzurum	En yüksek kazanca göre	10,11,12,1,2 / 3,4 / 5,6,7,8 / 9	70,0 / 35,6 / 7,8 / 37,5	1811,3
	Standart mevsimsel	12,1,2 / 3,4,5 / 6,7,8 / 9,10,11	69,7 / 25,5 / 7,8 / 54,5	1794,3
Antalya	En yüksek kazanca göre	11,12,1,2 / 3,4 / 5,6,7,8 / 9,10	62,7 / 30,4 / 4,8 / 43	1902,6
	Standart mevsimsel	12,1,2 / 3,4,5 / 6,7,8 / 9,10,11	63,4 / 22,2 / 7,9 / 48,7	1828,1
Hakkâri	En yüksek kazanca göre	11,12,1,2 / 3,4 / 5,6,7,8 / 9,10	68,5 / 33,6 / 5,2 / 42,8	1941,2
	Standart mevsimsel	12,1,2 / 3,4,5 / 6,7,8 / 9,10,11	68,2 / 22,8 / 5,0 / 49,7	1925,7

Dört dönemli eğim açısı seçiminde, Bursa, Antalya ve Hakkâri illerinde bahar ve sonbahar dönemlerinin sırasıyla 3, 4 ve 9, 10 numaralı aylar olarak ikişer ay seçilmesi üçer aylık dönemlere göre daha fazla kazanç sağlamaktadır. Erzurum da ise sonbahar dönemini daha da kısa sadece 9'ncü ay olarak seçmek daha avantajlıdır. Örnek olarak, Hakkâri ili için dört mevsim yerine uygun dört dönem seçiminin aylık güneş ışınımına etkisi Şekil 5'te karşılaştırılmıştır, farklı dönem seçimi ile eğik yüzeye gelen yıllık güneş ışınımı 1926 kWh/m²yıl'dan 1941 kWh/m²yıl'a yükselmektedir. Sonuç olarak maksimum fayda için, her ilin özelinde eğim açısı değişim periyotlarının belirlenmesi en uygun çözümdür.



Şekil 5. Hakkâri ili için dönem seçimin mevsimsel ve uygun ay yöntemi ile yapılmasının aylık güneş ışınımına etkisi (4 dönem)

İncelen dört il için eğim açısı bakımından yılın bölüneceği dönem sayısının yıllık toplam güneş ışınımı kazancına etkisi yüzdelik oranlarla Şekil 6’da birlikte verilmiştir. Optimum eğim açısının yılın iki dönemi içinin belirlenmesi asıl kazancı oluşturmaktadır, üç veya dört dönemli eğim açısı seçimin ek getirisi oldukça sınırlıdır. Örnek olarak, Bursa ilinde iki, üç ve dört dönemli optimum eğim açısı seçimi, yıllık güneş ışınımında sırasıyla, 4,54%, 4,79% ve 5,26% kazanç sağlamaktadır, Hakkâri ilinde ise bu oranlar sırasıyla, 6,21%, 6,86% ve 6,94%’tür.

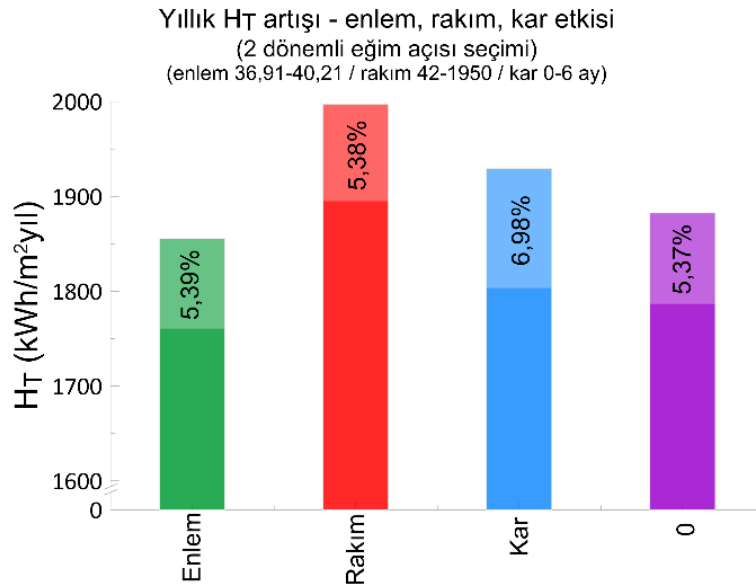


Şekil 6. Dört il için yıllık eğim açısı dönem sayısı seçimin güneş ışınımı kazancına etkisi

Optimum eğim açısı seçimi en yüksek yıllık kazancı Hakkari’de en düşük yıllık kazancı ise Bursa’da gerçekleştirmektedir. Erzurum da Hakkari’ye yakın kazanım artışları sunmaktadır. Bu durum enlemin optimum açıyla elde edilen kazanç artışında etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Kazanç artışını etkileyen etmenin rakım veya karlılık olup olmadığının tespiti için Erzurum ilinin karsız olduğu farazi durum incelenmiş, karsız

durumda kazancın 4,86% 'ya düştüğü bu nedenle asıl kazancı tetikleyen etkinin uzun süren kar örtüsü olduğu tespit edilmiştir.

Enlem, rakım ve kar etmeninin etkisinin daha somut olarak ortaya konulabilmesi açısından, Antalya ilinin enlem, rakım ve karlılık durumu farazi olarak ayrı ayrı değiştirilmiş ve iki dönemli eğim açısı seçiminde oluşan yıllık güneş ışınım kazanımları Şekil 7'de gösterilmiştir. 0 ile belirtilen bar, Antalya ili için gerçek hali temsil etmektedir. Görüldüğü üzere, en yüksek kazancı kar örtüsü sağlamaktadır. Antalya ilinde farazi altı aylık kar örtüsü durumunda iki dönemli optimum eğim açısı seçimi sistemde 6,98% ek kazanç sağlarken, enlemin 36,91° yerine 40,21° olması halinde kazanç 5,39%, rakımın 42 m yerine 1950 m olması halinde ise kazanç 5,38% olmaktadır. Antalya'nın gerçek değerleri için ise kazanç 5,37%'dir. Rakım ve enlem değerinin optimum eğim açısının kazancına görülür bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Tabi bu durumun Türkiye şartları için öngörüldüğü unutulmamalıdır. Yükseklik farkının daha fazla olduğu veya enlem farkının daha çok olduğu ülkeler için geniş aralıklı incelemeler yapılmalıdır.



Şekil 7. Enlem, rakım ve karlılık durumu değişiminin yıllık güneş ışınımına etkisi

Tablo 5. Sembollerin tanımları ve birimleri (Nomenclature)

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)			
d	Yılın gün değeri	n/N	İzafi güneşlenme süresi
G_{sc}	Güneş sabiti (1367 W/m ²)	\bar{R}_b	Eğik ve yatay düzleme düşen direkt ışınım oranı
H	Yatay düzleme düşen günlük güneş ışınımı (J/m ² gün)	Z	Rakım (m)
H_b	Yatay düzleme düşen günlük direkt güneş ışınımı (J/m ² gün)	β	Eğik düzlemin eğim açısı (°)
H_d	Yatay düzleme düşen günlük yayılı güneş ışınımı (J/m ² gün)	δ	Deklinasyon açısı (°)
H_o	Atmosfer dışında yatay düzleme düşen günlük güneş ışınımı (J/m ² gün)	ϕ	Enlem açısı (°)
H_r	Eğik düzleme düşen günlük güneş ışınımı (J/m ² gün)	ω_s	Güneş batış açısı (°)
K_T	Berraklık endeksi	ω_s'	Güneşin eğik yüzeye ilk düşüş saat açısı (°)
n	Gerçek günlük güneşlenme süresi (h)	ρ	Yansıtma oranı (0,2-0,7)
N	Gün uzunluğu (h)		

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı enleme, rakıma ve kar örtüsü süresine sahip dört ilinde (Bursa, Erzurum, Antalya ve Hakkâri) güneş enerjisi kazancını en üst düzeye çıkarmak için optimum eğim açısı seçimleri incelenmiştir. İllerin farklı coğrafi ve iklim özellikleri, güneş ışınımı kazancındaki değişkenlikleri ortaya koymada önemli rol oynamıştır. Bu çalışmanın sonuçları, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak için her ilin coğrafi ve iklimsel özelliklerine göre optimum eğim açısı ve dönem değişimlerinin belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Araştırma sonuçlarına göre;

Kar örtüsü süresinin uzun olması optimum eğim açısının kazancını arttıran en önemli etken olarak belirlenmiştir. Kar örtüsünün uzun süreli olduğu Erzurum ve Hakkâri illerinde, yüksek eğim açılı döneminin 6 ay tutulması, kar yağışının az olduğu Antalya ve Bursa illerinde ise 7 ay tutulması daha yüksek güneş ışınımı kazancı sağlamaktadır. Kış döneminin kısa seçilmesi optimum eğim açısını arttırır bu ise ek bir fayda olarak yüzeyde kar birikimini azaltacaktır.

Yılın iki eğim açısı dönemine ayrılması asıl kazancı oluşturmaktadır. Üç ve dört dönemlik ayrımların ek getirisi oldukça sınırlıdır. Örnek olarak, Bursa ilinde iki, üç ve dört dönem belirlenmesi yıllık güneş ışınımında sırasıyla, 4,54%, 4,79% ve 5,26% kazanç sağlamaktadır. Yılda iki kez optimum açı değişimi, açı ayarlanabilir bir sistemin insan gücü ile yılda iki kez kumanda edilmesi ile sağlanabilir. Yaklaşık 5%'lik düşük kazanımına rağmen bu yöntem, kullanılacak sistemin basitliği ve harcanacak iş gücünün azlığı nedeniyle özellikle ticari işletmeler için faydalı olacaktır.

Yılın basmakalıp şekilde üçer aylık veya altışar aylık dönemlere bölünmesinden il özelinde yapılacak hesaplamalarla dönem uzunluklarının belirlenmesinin gerektiği görülmüştür. Örneğin, Bursa, Antalya ve Hakkâri ili için bahar dönemleri 3, 4 ve 9, 10 numaralı aylar olarak ikişer ay seçilmelidir.

Antalya ili enlem, rakım ve karlılık değerleri farazi olarak değiştirilerek yapılan analiz, dönemsel optimum açı seçiminin karlı bölgelerde daha fazla fayda sağladığını göstermiştir. Bunun nedeni, kar örtüsü ile artan yayılı ışınımından yüksek eğim açısı seçimi ile daha fazla faydalanılabilesidir.

Sonuç olarak, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak için her ilin özelinde optimum eğim açısı ve dönem değişimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, Türkiye'nin farklı coğrafi ve iklim koşullarına sahip bölgelerinde güneş enerjisinden maksimum fayda sağlanmasını mümkün kılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Ang TZ, Salem M, Kamarol M, Das HS, Nazari MA, Prabakaran N (2022) A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews* 43:100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
2. Pourasl HH, RV Barenji, Khojastehnezhad VM (2023) Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports* 10:3474-3493. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>
3. Endiz MS, Coşgun AE (2023) Assessing the potential of solar power generation in Turkey: A PESTLE analysis and comparative study of promising regions using PVsyst software. *Solar Energy* 266:112153. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112153>
4. Bakirci K (2012) General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8):6149-6159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.009>

5. Atlım F, Esen B, Demirtaş M (2019) Balıkesir ilinde farklı iki GES tesisinin panel yerleşimi açısından verimliliklerinin karşılaştırılması. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 21(2):679-696. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.636967>
6. Bakirci K (2020) Yüzey eğimlerinin güneş enerjisi potansiyeline etkisi. Tesisat Mühendisliği Dergisi 175:30-38.
7. Çağlar A (2018) Farklı derece-gün bölgelerindeki şehirler için optimum eğim açısının belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 22(2):849-854. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.9489>
8. Dal AR (2021) Güneş enerji panellerindeki optimum eğim açısının verime etkisinin incelenmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 8(1):241-250. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.878795>
9. Dal AR (2021) Yat limanlarındaki güneş enerji santralleri panel eğim açısı değişiminin elektrik üretimi açısından incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 9(4):1113-1127. <https://doi.org/10.29130/dubited.869639>
10. Güner E (2023) Iğdır ilinde güneş enerjisi uygulamaları için optimum panel eğim açısının belirlenmesi. Journal of the Institute of Science and Technology 13(4):2905-2914. <https://doi.org/10.21597/jist.1314641>
11. Kaba MY, Seyhan AK, Celen P, Celen A (2022) Farklı eğim açılarında güneş kolektörlerinin enerji ve ekserji analizi: Erzincan ili örneği. Konya Journal of Engineering Sciences 10(3):634-648. <https://doi.org/10.36306/konjes.1096936>
12. Koçer A, Şevik S, Güngör A (2016) Ankara ve ilçeleri için güneş kolektörü optimum eğim açısının belirlenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 21(1):63-78. <https://doi.org/10.17482/uujfe.80088>
13. Yağlı H, Koç Y (2020) Gaziantep bölgesi için güneş enerjisinden elektrik üretiminde kurulacak panellerin optimum eğim açılarının belirlenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 19:475-483. <https://doi.org/10.31590/ejosat.733530>
14. Yücel M, Kılıçarslan Y, Yıldırım M (2018) Güneş takip sistemiyle çalışan güneş panellerin sulama uygulamasında verimlilik düzeyleri. ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi 6:123-130.
15. Arslan F, Türkdoğan S (2022) Kamu binalarında çatı üzeri fotovoltaik panel kurulum potansiyelinin belirlenmesi ve enerji üretim artışı için mimari tasarımın ele alınması: Yalova ili örneği. Journal of Innovative Engineering and Natural Science 2(2):76-94. <http://dx.doi.org/10.29228/JIENS.63060>
16. Liu B, Jordan R (1960) The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy 4(3):1-19.
17. Liu B, Jordan R (1961) Daily insolation on surfaces tilted towards equator. Journal of ASHRAE 10:53-59.
18. Yiğit A, Atmaca İ (2010) Güneş Enerjisi. Alfa Aktüel Yayınları, Bursa
19. T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2024), Güneşlenme süreleri. <https://www.mgm.gov.tr/kurumici/turkiye-guneslenme-suresi.aspx?l=tr>. Erişim 20 Temmuz 2024