
ANLIK IŞINIM ŞİDDETİ VE ÇEVRESEL FAKTÖRLERE BAĞLI OPTİMUM PV PANEL AÇISI, VERİM, GÜÇ ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ

*Abdulvahap YİĞİT**^{ID}
*Nurullah ARSLANOĞLU**^{ID}

Alınma: 11.11.2020; düzeltme: 15.02.2021; kabul: 31.03.2021

Öz: Bu çalışmada PV panellerinin; anlık ışınım şiddeti değerlerinin hesabıyla; aylık, mevsimlik ve yıllık optimum eğim açıları bulunmuş, çevre sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi parametrelerin panel verimleri ve panel elektrik gücü üzerinde etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan farklı optimum eğim açısı hesaplama yönteminde; eğik düzlem üzerine gelen anlık ışınım değerlerinin gün boyunca toplamı hesaplanmış ve bu hesaplama 365 gün için ayrı ayrı yapılmıştır. Böylece günlük, aylık, mevsimlik ve yıllık ışınım hesaplamaları yapılarak bu ışınım değerlerini maksimum yapan optimum açı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, aylık ortalama günlük ışınım değerleri kullanılarak bulunan optimum eğim açısı değerlerinden 3-5° daha farklı bulunmuştur. Bu hesaplamalar 6 farklı il için yapılarak optimum eğim açıları bulunmuş, PV panellerinin optimum eğim açısı ile yerleştirilmesi durumunda panel üzerine gelen anlık ışınım, anlık panel verimleri ve üretilen elektrik gücü değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda çevre sıcaklığı ve rüzgar hızının etkisi de dikkate alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş PV, Optimum açı, verim ve güç, panel sıcaklığı, rüzgar hızı.

Investigation of Optimum Pv Panel, Efficiency, Power Depend on Instant Solar Radiation and Environmental Factors

Abstract: In this study, PV panels; By calculating the instantaneous total radiation values; The monthly, seasonal and annual optimum tilt angles were found, and the effects of parameters such as environmental temperature and wind speed on panel efficiency and panel electrical power were investigated. In the different method of optimum tilt angle calculation used in this study; The sum of instantaneous total radiation values coming on the titled surface during the day was calculated and this calculation was made separately for 365 days. Thus, daily, monthly, seasonal and annual radiation calculations were made and optimum tilt angle values that maximize these radiation values were obtained. The results obtained were found to be 3-5° different from the optimum tilt angle values obtained by using monthly average radiation values. These calculations were made for 6 different provinces and optimum tilt angles were found. In case the PV panels are placed with the optimum tilt angle, the instantaneous radiation on the panel, instantaneous panel efficiencies and generated electrical power values were calculated. In these calculations, the effect of environmental temperature and wind speed is also taken into account.

Keywords: Solar PV, efficiency and power, optimum tilt angle, PV temperature, wind speed

*Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Nilüfer, Bursa

İletişim Yazarı: Nurullah Arslanoğlu (narslanoglu@uludag.edu.tr)

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi yenilenebilir ve temiz bir enerji türüdür. Ülkemiz güneş enerjisi açısından zengin bir bölgede yer almaktadır. Geçmişte güneş enerjisinin ısı uygulamaları daha önemli ve yaygın kullanıma sahip iken, günümüzde güneş pilleri vasıtasıyla elektrik üretimi çok daha fazla önem kazanmıştır. Güneş PV panellerinin verimlerinin yükselmesi ve fiyatlarının düşmesiyle GES(Güneş Enerjisi Santralleri) sayısında ve kapasitelerinde çok önemli artışlar olmuştur. Dünyadaki gelişmelere paralel olarak ülkemizde GES sayısı ve kapasitesi hızlı bir şekilde artmaktadır. Güneşten elektrik üretimine verilen destek sayesinde, GES için geri ödeme süreleri 5 yıl civarına düşmüştür(Yiğit ve Atmaca 2018). Bunun sonucu olarak da güneşten elektrik üretimi alanındaki yatırımlar artmaktadır. Ancak konu ülkemizde yeni olduğundan kurulan GES tesislerinin yüksek verimlerle çalıştıkları pek söylenemez. Genelde çok kristalli silikon PV panelleri kullanılmakta ve GES tesislerinde PV panelleri sabit açılı olarak yerleştirilmektedir. Güneş takip sistemleri çok pahalı ve maliyetli olduğundan çok fazla tercih edilmemektedir. Güneş ışınlarının yazın daha dik kışın ise daha yatık geldiği bilinmektedir. Dolayısıyla optimum PV panel eğim açıları, anlık olarak değişim göstermektedir. GES tesisleri için yapılan fizibilite hesaplamaları optimum eğim açısına göre yapılmaktadır. Optimum eğim açısı hesaplamaları da farklı şekillerde yapılmaktadır. Aylık ortalama günlük güneş ışınımı değerleri ile yapılan optimum eğim açısı hesaplamaları, kolay olduğu için tercih edilmektedir. Diğer taraftan PV panel sıcaklıklarının verim üzerinde önemli etkileri olduğu bilinmektedir. Panel sıcaklığını etkileyen en önemli parametreler ise rüzgâr hızı ve çevre sıcaklıklarıdır. Aynı çevre sıcaklığında rüzgâr hızının artmasıyla panel sıcaklığının düştüğü ve verimin de arttığı bilinmektedir(Sánchez ve ark., 2016). Dolayısıyla GES yer seçiminde, güneşten gelen ışınım şiddeti yanında, çevre sıcaklığı ve rüzgâr hızının da dikkate alınması gerekmektedir. Çevre sıcaklığı ve ışınım şiddetinin bulunması için yapay sinir ağları yönteminin uygulandığı bir çalışmada, İzmir ili için örnek bir çalışma sonuçları verilmiştir(Işık ve Inallı 2018). Bu yöntem kullanılarak bütün bölgelerde GES için çevre sıcaklık ve ışınım değerleri belirlenebilir.

PV panellerini optimum eğim açısı ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Farklı yarımküre ve bölgeler için optimum eğim açısı ile ilgili çalışmaların yayınlandığı çalışmada, bu konuda önemli çalışmalar ve eşitlikler özetlenmiştir (Hafez ve ark. 2017). Ülkemiz farklı illeri için optimum eğim açısı ile ilgili yapılan çalışmada, 8 ayrı bölgede bulunan 8 il için aylık ortalama optimum eğim açısı hesaplanmış ve ülkemiz için, deklinasyon açısına bağlı, optimum eğim açısı eşitliği verilmiştir (Bakirci, 2012). Bir diğer çalışma İzmir ili için yapılmış, bu çalışmada yaz ve kış için ayrı ayrı optimum eğim açıları elde edilmiştir. Kış ayları için $\beta_{opt} = \varphi + 19$ ve yaz ayları için ise $\beta_{opt} = \varphi - 34$ eşitlikleri verilmiştir (Ulgen ve Hepbasli, 2003). Burada φ enlem açısını göstermektedir. Şanlıurfa için yapılan bir diğer çalışmada, yıllık ortalama optimum açı değeri $\beta_{opt} = \varphi - 7$ olarak, Ekim-Mart arası optimum eğim açısı $\beta_{opt} = \varphi + 19$ ve Nisan-Eylül arası $\beta_{opt} = \varphi - 28$ bulunmuştur. Bu çalışmada, mevsimsel optimum değerlere göre panel üzerine düşen enerjinin, yıllık optimum açığa göre %2.5 daha fazla olduğu belirlenmiştir (Yildirim ve Aktacir, 2019).

Güneş pilleri ve panel sıcaklığı ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış ve farklı bağıntılar verilmiştir.

En basit bağıntı şu şekilde verilmiştir (Arslanoğlu ve ark. 2020):

$$T_C = T_a + (T_{NOCT} - 20) \frac{I}{800} \quad (1)$$

Burada T_C ; güneş pili (cell) sıcaklığı($^{\circ}C$), T_a ; çevre sıcaklığı($^{\circ}C$), T_{NOCT} ; güneş pilinin normal sıcaklığıdır ve $45^{\circ}C$ olarak kabul edilmiştir. I anlık güneş ışınım (W/m^2) değeridir. Bu ifadeye bağlı olarak güneş pili verimi ise şu şekilde verilmiştir (Arslanoğlu ve ark. 2020):

$$\eta = -0.05T_c + 12.757 \quad (2)$$

Güneş pili sıcaklığı ile ilgili verilen diğer bağıntılar ise şu şekildedir (Akhnessi ve ark. 2018):

$$T_c = 30 + 0.0175(I - 300) + 1.14(T_a - 25) \quad (3)$$

$$T_c = T_a - k_{\Delta T} I \quad (4)$$

Burada $k_{\Delta T} = 0.02-0.04 \text{ Km}^2/\text{W}$ aralığında alınmalıdır. Aynı araştırmacıların verdiği bir diğer bağıntı ise şöyledir:

$$T_c = T_a + \omega \left(\frac{0.32}{8.91 + 2v} \right) I \quad (5)$$

Burada v rüzgar hızı (m/s) ve w bir katsayıdır. Bu değer arazi üzerindeki paneller için 1.0, düz çatıda 1.2, eğimli çatıda 1.8 ve cephe kaplaması durumunda 2.4 olarak alınmalıdır.

Güneş pillerinin oluşturduğu güneş paneli (modül) sıcaklığı için ise şu ifadeler verilmiştir (Akhnessi ve ark. 2018):

$$T_m = T_a + I e^{(a+bv)} \quad (6)$$

Burada $a = -3.56$ ve $b = -0.075$ olarak alınacaktır.

$$T_m = T_c + \frac{I}{I_0} \Delta T_0 \quad (7)$$

Bu eşitlikte, $I_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ ve $\Delta T_0 = 3$ olarak alınabilir.

Modül sıcaklığına bağlı olarak PV panel verimi ise şu eşitlikten bulunabilir (Akhnessi ve ark. 2018):

$$\eta_{PV} = \eta_{STC} \left[1 + \beta_{Pmp} (T_m - T_{ref}) \right] \left[1 + \gamma_{Pmp} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \right] \quad (8)$$

Bu eşitlikte monokristal silikon güneş panelleri için $\eta_{STC} = 0.181$, $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, $\beta_{Pmp} = -0.39$ olarak alınabilir. $\gamma_{Pmp} = 0.03-0.12$ arasında değişir ve bu değer bu çalışmada 0.04 olarak alınmıştır.

Panel sıcaklığı ve panel verimi üzerinde çevre sıcaklığı ve rüzgârın etkisini inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Güneş ışınım şiddeti, çevre sıcaklığı ve rüzgâr hızının panel sıcaklığı, panel verimi ve panelin ürettiği elektrik gücü üzerinde etkisinin incelendiği bir çalışmada, artan rüzgar hızının panel verimini artırdığı elde edilmiştir (Gökmen ve ark., 2016). Rüzgâr hızı, ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığına bağlı olarak anlık panel sıcaklığının değişiminin incelendiği çalışmada (Aly ve ark., 2019) ise zamana bağlı panel sıcaklığının değişimi bulunmuştur. Bu çalışmada ayrıca panel sıcaklığının değişimi çatı tipi GES ve arazi tipi GES uygulamaları için ayrı ayrı bulunmuştur. Paneli oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlı olarak panel sıcaklığının değişimi de bu çalışmada incelenmiştir. PV paneli üzerinde rüzgar akışına bağlı olarak elde edilen farklı ampirik ısı taşınım katsayılarının incelendiği bir diğer çalışmada, deneysel ölçümlere en uygun ampirik bağıntı bulunmuş, ayrıca farklı çevresel parametreler için verim ve elektrik enerjisinin değişimleri elde edilmiştir (Notton ve ark., 2005). (Skolpi ve ark. 2008) yaptıkları bir çalışmada uygun yerleştirilmiş panellerin sıcaklıklarının değişimini, çevresel parametrelere bağlı olarak, incelemişlerdir. (Barroso ve ark. 2016) yaptıkları çalışmada panel verimi ve elektrik üretimi üzerine çevresel değişkenlerin etkisini incelemişler ve panelin ısı davranışlarını ortaya koymuşlardır. Yapılan diğer bir çalışmada, güneş ışınım şiddeti, çevre sıcaklığı ve rüzgar hızının panel sıcaklığına etkisi incelenmiştir (Vogt ve ark., 2015). Rüzgâr hızının

özellikle 0 m/s ile 2 m/s aralığında panel sıcaklığına etkisinin büyük olduğu, 4m/s rüzgar hızından sonra ise artan rüzgar hızının etkisinin çok küçük olduğu elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada ülkemizde seçilen 6 il için yıllık, mevsimlik ve aylık optimum panel eğimleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, literatürdeki diğer hesaplamalardan farklı olarak, anlık ışınımın toplamı yapılarak günlük ışınım değerleri hesaplanmıştır. Genelde optimum açı hesaplamalarında kullanılan yöntemde, aylık ortalama günlük güneş ışınımı eşitlikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada iki hesaplama yöntemi ile bulunan optimum açı değerlerinin karşılaştırması da yapılarak aradaki fark da ortaya konulmuştur. Anlık değerlerin toplamı ile birim eğik yüzey üzerine gelen günlük, aylık, mevsimlik ve ışınım miktarları MATLAB programlama dilinde yazılan programla hesaplanmaktadır. Yüzey eğim açısı değiştirilerek toplam ışınım değerleri bulunmuş ve bu toplam ışınım değerlerini maksimum yapan açı bulunarak optimum günlük, aylık, mevsimlik ve yıllık açı değerleri hesaplanmıştır. Birim yüzeyden üretilen elektrik gücü için de anlık hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Anlık çevre sıcaklığı, rüzgâr hızı ve ışınım değerleri kullanılarak anlık verim bulunmuştur. Anlık verim ve anlık ışınım değerlerinden de anlık elektrik güç üretimleri bulunmuştur. Bu anlık değerlerin toplamı ile günlük, aylık, mevsimlik ve yıllık elektrik güç üretimleri de hesaplanmıştır. Rüzgâr hızındaki değişimin panel elektrik güç üretimi üzerindeki etkisi de ayrıca incelenmiştir. Farklı çevre sıcaklıklarına sahip iller için hesaplamalar yapılarak çevre şartlarının elektrik güç üretimi üzerinde etkileri de ortaya konulmuştur.

2. TEORİK YÖNTEM

Teorik yöntem iki kısımdan meydana gelmektedir. İlk kısımda eğik düzleme gelen güneş ışınımı hesapları verilmiştir. İkinci kısımda ise PV panel sıcaklığı ve verimi ile ilgili kullanılan eşitlikler belirtilmiştir.

2.1. Güneş Işınımı Hesapları

Yeryüzüne düşen güneş enerjisi hesaplamalarında; yatay düzleme düşen aylık ortalama günlük ışınım verileri kullanılarak eğik düzleme gelen güneş ışınımı hesaplamaları yapılmaktadır. Bu kısımda yapılan hesaplamalarda ilgili kaynakta verilen bağıntılar kullanılmıştır(Yiğit ve Atmaca 2018).

Hesaplamalarda çoğunlukla gerekli olan, atmosfer dışında yatay birim düzleme gelen günlük güneş ışınımıdır(J/m^2 -gün) . Bu değer şu eşitlikten bulunabilir:

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \times \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta \right] \quad (9)$$

Burada; Güneş sabiti (G_{sc}) değeri %1 hata ile $1367 W/m^2$ olarak kabul edilmektedir. Bu eşitlikte bulunan; ω_s gün doğuş ve batış saat açısı, φ enlem açısı ve δ deklinasyon açısıdır ve bu açı değerleri ($^\circ$) olarak alınmalıdır.

Belirli bir bölgede yatay düzleme gelen aylık ortalama günlük güneş ışınımı(H) için,

$$\frac{H}{H_o} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (10)$$

eşitliği kullanılmıştır.

Burada;

a, b = Bölgeye bağlı sabitler

n/N =İzafi güneşlenme süresi(Güneşlenme süresi/gün uzunluğu)

Türkiye için bu değerler enlem açısı (ϕ), deklinasyon açısı (δ) ve konumun deniz seviyesinden metre olarak yüksekliğine (Z) bağlı olarak şu şekilde verilmektedir:

$$a = 0.103 + 0.000017Z + 0.198 \cos(\varphi - \delta) \quad (11a)$$

$$b = 0.533 - 0.165 \cos(\varphi - \delta) \quad (11b)$$

Berraklık indeksine (K_T) bağlı olarak günlük yatay düzleme gelen yayılı ışınımın toplam ışınımına oranı şu eşitlikten bulunur:

$$\frac{H_d}{H} = 0.703 - 0.414 K_T - 0.428 K_T^2 \quad (12)$$

Yeryüzünde yatay birim düzleme gelen aylık ortalama günlük güneş ışınımını bulmak için izafi güneşlenme süresine bağlı olarak Eş. 2 kullanılabilir gibi, berraklık indeksine bağlı olarak;

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (13)$$

eşitliği de kullanılabilir.

Yatay yüzeye düşen günlük güneş ışınımından faydalanılarak anlık ışınımın hesabını yapmak mümkündür. Yatay yüzeye düşen anlık toplam güneş ışınımının (I) (W/m^2) yine yatay yüzeye düşen günlük toplam güneş ışınımına (H) oranı r_t olarak tanımlanmaktadır,

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - (2\pi\omega_s / 360) \cos \omega_s} \quad (14)$$

burada a ve b katsayıları,

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (15a)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (15b)$$

şeklindedir.

Yatay düzleme gelen ışınımın yayılı kısmını bulmak için şu eşitlik kullanılabilir:

$$\frac{I_d}{I} = 0.788 - 0.802 K_T (0.265 < K_T < 0.6) \quad (16)$$

Gün uzunluğu veren bağıntı ise şu şekildedir:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta) = \frac{2}{15} \omega_s \quad (17)$$

Eğik düzlem üzerine güneş ışınlarının ilk düşüş saat açısı (ω'_s) gün doğuş açısından farklıdır. Bu değer, şu şekilde bulunur;

$$\omega'_s = \min \left[\begin{array}{l} \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta) \\ \cos^{-1} (-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \end{array} \right] \quad (18)$$

Denklemden kullanılan “min” ifadesinin anlamı bu iki değerden küçük olanının alınacağını göstermektedir.

Geometrik faktör R_b eğik yüzeye düşen anlık direkt ışınımın (I_{bT}), yatay yüzeye düşen anlık direkt ışınımına (I_b) oranı olarak tanımlanmaktadır, kuzey yarımküre için bu değer şu ifadeden bulunur:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta)\cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta)\sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (19)$$

I_{bT} , I_{dT} ve I_{ref} için sırasıyla, eğik düzleme gelen direk, yayılı ve yansıyan anlık ışınım miktarlarıdır. Bunların toplamı eğik düzleme gelen anlık ışınımına eşittir. Buna göre eğik düzleme gelen toplam anlık ışınımı,

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (20)$$

eşitliğinden bulunur. Eğik yüzeye düşen günlük ortalama toplam ışınım ise,

$$H_T = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) \bar{R}_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (21)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Burada \bar{R}_b eğik yüzeye düşen günlük direkt ışınımın (H_{bT}) yatay yüzeye düşen günlük direkt ışınımına (H_b) oranı olarak tanımlanmaktadır. Kuzey yarımkürede güneye dönük yüzey ($\gamma=0^\circ$) için şu eşitlikle verilmiştir:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta)\cos \delta \sin \omega'_s + (\pi / 180)\omega'_s \sin(\varphi - \beta)\sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi / 180)\omega_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (22)$$

Bu çalışmada, hesaplamalar berraklık indeksi veya izafi güneşlenme sürelerine göre ayrı ayrı yapılmıştır. Berraklık indeksi değerleri NASA web sitesinden (NASA, 2019) , güneşlenme süreleri ise MGM web sitesinden (MGM, 2019) farklı şehirler için alınmıştır. Program içinde gün uzunlukları bulunarak izafi güneşlenme süreleri hesaplanmıştır.

2.2. PV Panel Sıcaklığı ve Verimi Hesaplamaları

Panel sıcaklığı ve verimi ile ilgili, yukarda verildiği gibi, çok sayıda bağıntı bulunmaktadır. Bu çalışmada panel sıcaklığını hesaplamak için Eşitlik 6 ve panel verimini bulmak için ise Eşitlik 8 kullanılmıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Güneş enerjisi hesaplamalarının yapılabilmesi için MATLAB programlama dilinde bir simülasyon programı yazılmıştır. Bu program, yılın 365 gününde her gün için, yatay ve eğik düzleme düşen anlık ve günlük güneş ışınım değerlerini hesaplamaktadır. Günlük sıcaklık değerleri ve rüzgâr hızlarını kullanarak günlük panel verimlerini ve panelin birim yüzeyinden üretilen elektrik gücünü hesaplamaktadır. Bu günlük değerler toplanarak, aylık, mevsimlik ve yıllık birim yüzeye düşen güneş ışınımı ve üretilen elektrik miktarları bulunabilmektedir.. Eğik düzleme ilk düşüş ve son düşüş saat açıları hesaplatılarak, güneşlenme süresince gelen anlık direk, yayılı ve yansıyan ışınım hesapları yapılabilmektedir. Hesaplamalarda öncelikle, ortam yansıtma oranı sabit olarak 0.2 değerinde alınarak hesap yapılmış daha sonra ise her ay için ortalama yansıtma değerleri kullanılarak(Duffie ve Beckman, 1974) hesaplamalar da yapılmıştır. Bu yansıtma oranı değerleri, illerin iklimleri ile kış ve yaz ayları ayrı ayrı dikkate alınarak belirlenmiştir. Kış aylarında ortam yansıtma oranı daha büyüktür ve kar yağması durumunda 0.7 değerine kadar çıkmaktadır. Aylık yansıtma oranları ile sabit yıllık yansıtma oranına göre yapılan

hesaplamaların sonuçları bir birine çok yakın çıkmaktadır. Bu hesaplamalarda aylık yansıtma oranları kullanılmıştır.

Hesaplama algoritması şu şekildedir:

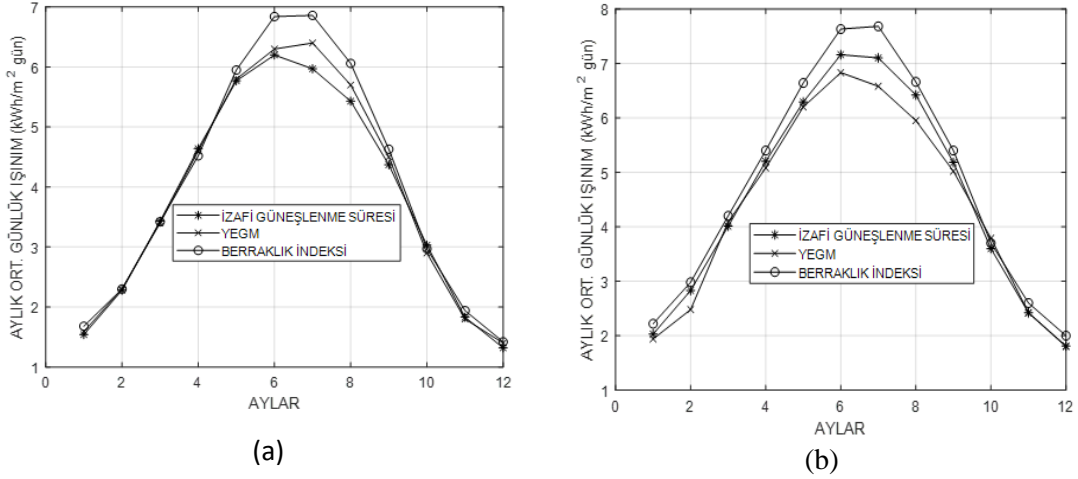
- Eşitlik 9-13 kullanılarak yatay düzleme düşen günlük ortalama ışınım miktarı bulunmaktadır. H_0 bulunduktan sonra H değerinin bulunması için Eşitlik 2 ve Eşitlik 6 ile ayrı hesaplama yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.
- Eşitlik 14-17 kullanılarak yatay düzlem üzerine düşen anlık ışınım bulunmaktadır.
- Eşitlik 18-20 ile eğik düzlem üzerine düşen anlık ışınım hesaplamaları yapılmaktadır.
- Bu çalışmada; eğik düzlem üzerine gelen anlık ışınımın, eğik düzlem üzerine ilk düşüş anından son geliş anına kadar anlık hesaplamaların gün boyunca toplamı alınarak günlük ışınım miktarları hesaplanmıştır.
- Modül verimleri gün boyunca anlık olarak Eşitlik 6 ve Eşitlik 8 kullanılarak hesaplanmaktadır.
- Anlık eğik düzlem üzerine gelen ışınım değerleri anlık verim değerleri ile çarpılarak anlık elektrik güç değerleri hesaplanmaktadır. Bu anlık değerlerin gün boyu toplanması ile de günlük elektrik üretim değerleri hesaplanmaktadır.
- Bu hesaplamalar 365 gün için yarı ayrı yapılarak yıllık, mevsimlik ve aylık ışınım değerleri ve elektrik gücü değerleri bulunabilmektedir.
- Eğim açısı değiştirilerek, yıllık ışınım toplamını maksimum yapan eğim açısı yani optimum eğim açısı bulunmaktadır. Bu işlemler her bir il için ayrı ayrı tekrarlanmaktadır.
- Eşitlik 20 ve Eşitlik 21 kullanılarak bulunan aylık ortalama günlük ışınım değerleri ile mevcut çalışmada anlatılan yöntemle bulunan günlük toplam ışınım değerlerinin karşılaştırması yapılmaktadır. Ayrıca her iki hesaplama yöntemiyle elde edilen optimum eğim açıları karşılaştırılmaktadır.

Günlük ve anlık güneş enerjisi hesaplamalarında n/N izafi güneşlenme süreleri veya K_T berraklık indeksi değerleri kullanılabilir. Burada berraklık indeksi değerleri (NASA) sitesinden, günlük güneşlenme süreleri ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) sitesinden alınmıştır. Eşit. 10 ve Eşit. 13 kullanılarak yapılan hesaplamalarda, günlük ortalama ışınım sonuçlarının birbirine çok yakın çıktığı görülmüştür. Bu çalışmada öncelikle, yapılan simülasyon ile bulunan aylık ortalama günlük güneş ışınımı değerleri, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) sitesinde (YEGM, 2019) verilen, ölçümlerle elde edilen, ortalama günlük güneş ışınımı değerleri ile karşılaştırılarak simülasyonun doğruluğu ortaya konulmuştur. Simülasyonda izafi güneşlenme süreleri ve berraklık indeksi eşitliklerine göre elde edilen sonuçlar, (YEGM) sitesinde verilen değerler ile Şekil 1' de iki farklı il için karşılaştırılmış ve sonuçların oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Panel sıcaklığına bağlı olarak panel verimi hesaplamalarında çevre sıcaklıkları; iller için MGM sitesinden alınmıştır. Simülasyon hesaplamalarında, illerin aylık ortalama maksimum sıcaklık değerleri, hesap yapılan ay için çevre sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Eşitlik 6'dan modül sıcaklığı ve Eşitlik 8'den panel verimi hesaplanmıştır. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde yer alan 6 il için hesaplamalar yapılmıştır. Öncelikle yılın her günü için, güneşe dönük yüzeylerde 0° ile 90° eğim açısı için, eğik düzlem üzerine gelen anlık güneş ışınımının bir gün boyunca toplamı yapılarak, eğik düzlem üzerine gelen günlük ışınım ve birim metrekare PV panelinden üretilen elektrik enerjisi hesaplamaları yapılmıştır. Bu iller arasında enlem derecesi farkı 2° civarında olduğundan yıllık toplam enerjiye göre optimum panel eğimleri arasındaki fark da 2° civarında bulunmuştur. Optimum eğim açısının bu 6 il için $29^\circ \pm 1$ olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan, eğik düzleme düşen anlık güneş ışınımının gün boyu toplamı alınarak hesaplanan aylık günlük güneş ışınımı hesabı ile 12 ayın ortalama günü dikkate alınarak (Örnek olarak Ocak ayı için $n=17$ alınır) yapılan optimum eğim açısı hesaplamalarının karşılaştırmaları Tablo 1'de verilmiştir.

Güneş enerjisi kitaplarında verilen, aylık ortalama gün sayısı ile yapılan hesaplama yöntemine göre optimum eğim açısı değeri $34^{\circ} \pm 1$ değeri elde edilmiştir. Bu iki hesaplama yöntemi ile elde edilen optimum aç değeri arasında yaklaşık 5° lik bir fark görülmüştür.

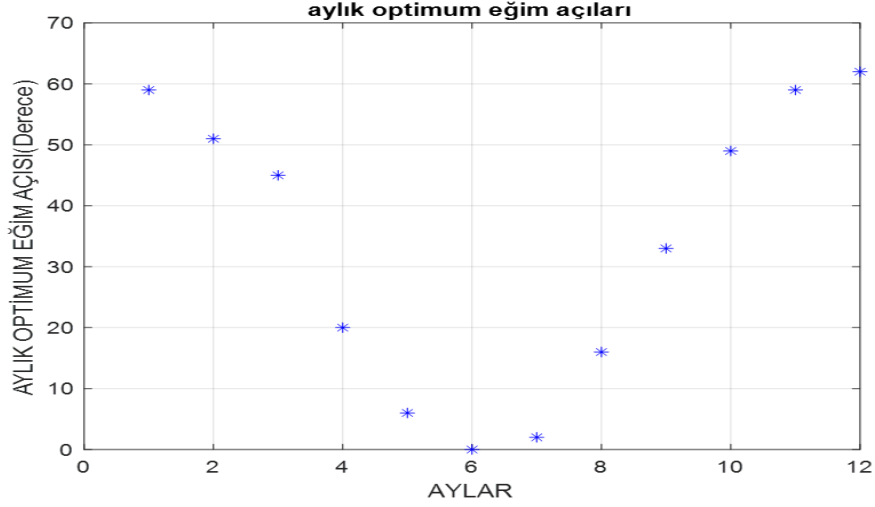
İki ayrı hesaplama yöntemi ile, 6 farklı bölgede yer alan 6 il ilin çevre verileri kullanılarak aylık optimum eğim açısı değeri hesaplanmıştır. Elde edilen aylık optimum aç değeri birbirine çok yakın ve ± 1 olarak bulunmuştur. Şekil 2’de aylık optimum eğim açısı değeri görülmektedir.



Şekil 1:
İki farklı il için aylık ortalama günlük güneş ışınımı değeri.
a. Bursa b.Şanlıurfa

Tablo 1. İki farklı yöntemle göre farklı iller için yıllık optimum eğim açıları.

	Anlık ışınım değeri ile bulunan aç (°)	Aylık ortalama günlük ışınım değeri ile bulunan aç (°)
Bursa (40.21°)	29	34
İzmir (38.39°)	29	33.5
Konya (37.97°)	29	33
Şanlıurfa (37.14°)	28	33
Elazığ (38.64°)	29	33
Erzurum (39.94°)	30	34



Şekil 2:
Aylara göre optimum eğim açıları.

6 farklı il için, yaz ve kış için optimum eğim açısı değerleri Tablo 2’de görülmektedir. Optimum açıda panellerin yerleştirilmesi durumunda PV panel yüzeyine gelen ışınım değerleri, rüzgâr hızı ve çevre sıcaklık değerlerine göre hesaplanan panel verimleri kullanılarak, panelden üretilen elektrik güç değerleri de bu tabloda verilmiştir. Hesaplamalarda rüzgâr hızı sabit ve 3 m/s değerinde alınmıştır. Kış ayları olarak 16 Ekim-15 Nisan aralığı (n=1-105 ve 288-365) ve yaz ayları olarak ise 15 Nisan-15 Ekim aralığı (n=105-287) alınmıştır. Bu Tabloda ilginç sonuçlar göze çarpmaktadır. Erzurum ilinde ışınım değerleri daha düşük olmakla birlikte, çevre sıcaklığı düşük olduğundan elektrik üretim kapasitesi izafi olarak yüksek değerlerdedir. Ancak bu ilimiz için kar etkisinin verimi olumsuz yönde etkileyeceğini dikkate almak gerekmektedir. Diğer taraftan Konya ili ışınım değerleri Şanlıurfa’dan küçük olmasına rağmen, Şanlıurfa’ya göre daha fazla elektrik gücü üretebileceği görülmüştür. İzmir ili ise nerdeyse Şanlıurfa ile aynı miktarda enerji üretmektedir. Bunun nedeni ise Şanlıurfa ilimizin çevre sıcaklık değerlerinin yüksek olmasıdır.

GES santrallerinde üretilen elektrik miktarı üzerinde rüzgarın etkisi de bu simülasyon programı ile incelenmiştir. Farklı rüzgâr hızlarında farklı şehirler için üretilen elektrik miktarları ise Tablo 4’de görülmektedir. Bu hesaplamalarda optimum yıllık eğim açısı değeri 30° olarak alınmıştır. Günlük sıcaklık değerlerine bağlı olarak hesaplanan verim değerleri kullanılarak elde edilen yıllık elektrik güçleri bu tabloda verilmiştir.

Bu tablodan görüleceği üzere, rüzgâr hızı üretilen elektrik enerjisini dikkate değer miktarda değiştirmektedir. Durgun havada üretilen enerji ile 7 m/s rüzgâr hızı şartlarında üretilen enerji arasındaki fark %4 civarındadır. Dolayısıyla GES santrallerinin kurulumunda rüzgarlı bölgelerin tercih edilmesi uygun olmaktadır.

Tablo 2. Farklı iller için mevsimlik optimum eğim açıları, gelen ışınım ve üretilen elektrik miktarları.

	KIŞ(16 Ekim-15 Nisan)			YAZ(16 Nisan-15 Ekim)		
	Optimum Açılı(°)	Işınım (kW/m ²)	Elektrik Üretimi(kW/m ²)	Optimum Açılı(°)	Işınım (kW/m ²)	Elektrik üretimi(kW/m ²)
İzmir	51	690.22	80.15	12	1104.30	119.28
Bursa	51	593.26	69.89	14	1078.28	117.75
Elazığ	51	678.39	81.09	13	1122.34	121.45
Konya	50	710.16	84.49	12	1128.29	123.66
Erzurum	52	656.32	80.81	14	1067.42	119.59
Şanlıurfa	50	698.196	81.088	11	1141.43	120.78

Tablo 3. Farklı iller için sabit ve mevsimlik açı değerlerinde gelen yıllık ışınım ve üretilen elektrik değerleri.

	Sabit açıda ışınım(kW/m ²)	Mevsimlik açıda ışınım(kW/m ²)	Sabit açıda elektrik(kW/m ²)	Mevsimlik açıda elektrik(kW/m ²)
Bursa	1561.86	1671.54	177.37	187.64
Erzurum	1664.23	1723.74	195.56	200.4
İzmir	1730.66	1794.52	193.8	199.43
Konya	1774.37	1838.45	202.63	208.15
Elazığ	1738.99	1800.73	197.91	202.54
Şanlıurfa	1798.64	1865.16	199.54	204.91

Tablo 4. Farklı rüzgar hızlarında PV panelinden üretilen yıllık elektrik enerjisi (kW/m²).

Rüzgar Hızı(m/s)	Bursa	Şanlıurfa	İzmir	Konya	Erzurum	Elazığ
0	171.16	191.4	186.76	194.86	188.1	189.65
1	173.18	194.02	189.19	197.42	190.35	192.13
2	174.58	195.82	190.86	199.77	191.91	193.83
3	175.59	197.15	192.09	200.46	193.05	195.08
4	176.37	198.15	193.02	201.45	193.92	196.04
5	176.98	198.95	193.76	202.23	194.61	196.79
6	177.48	199.59	194.36	202.85	195.16	197.40
7	177.88	200.13	194.85	203.37	195.62	197.91

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada güneş enerjisi santrallerinin yüksek verimli çalıştırılması için önemli bazı parametrelerin elektrik güç üretimi üzerinde etkileri incelenmiştir. GES kurulumunda ve işletiminde, önemli bazı noktalara dikkat edilmesi durumunda, yıllık bazda %10 daha fazla elektrik gücü elde edilmesinin mümkün olabileceği ortaya konulmuştur. Bu elektrik santrallerinde optimum eğim açısında panellerin yerleştirilmesi en önemli husustur. Bu çalışmada; anlık ışınımın toplamı ile yapılan hesaplama ile elde edilen yıllık optimum eğim açısı değerlerinin, aylık ortalama günlük değerler üzerinden yapılan hesaplamalarla elde edilen yıllık optimum eğim açısı değerlerinden yaklaşık 4-5° daha küçük olduğu bulunmuştur. Bu hesap yönteminin daha hassas sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Diğer taraftan, ülkemizin farklı bölgelerinde bulunan iller için bulunan optimum eğim açısı değerleri incelendiğinde, optimum eğim açısının, enlem derecelerindeki değişime göre, 1-2° farklılık gösterdiği görülmüştür.

GES tesislerinde paneller genellikle sabit optimum açıda yerleştirilmektedir. Güneş takip sistemleri pahalı ve işletimi de zor olduğundan pek tercih edilmemektedir. Ancak yaz ve kış olmak üzere iki açılı sistemlerin ilk kuruluş maliyetleri düşük ve işletme giderleri de yok denecek kadar azdır. Sadece yılda iki kez toplayıcı açıların değiştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, mevsimlik açı değişimi yapılan bir GES tesisinde %4 civarında bir elektrik güç üretimi artışı sağlanabileceği görülmüştür.

Diğer taraftan, güneş enerjisi santrallerinin verimini etkileyen iki önemli parametre daha bu çalışmada incelenmiştir. Bu parametreler çevre havası sıcaklığı ve rüzgar hızıdır. Çevre havası sıcaklığının etkisi en açık bir şekilde Tablo 4'den görülmektedir. Yapılan hesaplamalarda; çevre havası sıcaklığı daha yüksek olan Şanlıurfa'nın, güneş ışınım şiddeti daha yüksek olmasına rağmen, Konya'dan daha az elektrik üretilabileceği bulunmuştur. Diğer taraftan, rüzgar hızının da panelden üretilen elektrik enerjisi üzerinde kayda değer bir etkisinin olduğu görülmektedir. Aynı ışınım şiddeti ve çevre sıcaklığında; hava hızının 7 m/s değeri ile durgun olması durumunda, üretilen elektrik enerjileri arasında %4-5 civarında fark olduğu görülmektedir. Bu sonucun özellikle GES tesislerinin yer seçiminde dikkate alınması gerekir. Şu anda ülkemizdeki rüzgarlı bölgelerde kurulu olan Rüzgar Enerjisi Santrallerinde zaten elektrik taşıma hatları bulunmaktadır. Bu bölgelere GES tesislerinin de kurulması halinde yüksek verimle elektrik üretimi mümkün olacaktır.

Sonuç olarak; kurulacak GES santralleri için bu çalışmada elde edilen sonuçlar dikkate alınarak yer seçimi ve panellerin yerleştirilmesinin yapılması durumunda, önemli ölçüde elektrik güç kayıplarının önlenmesi mümkün olabilecektir.

Panel üzerinde biriken tozun ve rüzgâr yönünün de panel elektrik güç üretimi üzerinde etkili parametreler olduğu bilinmektedir. Bu parametrelerin etkisinin de sonraki çalışmalarda incelenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Abdulvahap Yiğit çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi, makale taslağının oluşturulması, son onay ve tam sorumluluk, Nurullah Arslanoğlu çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin yönetimi, fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk.

KAYNAKLAR

1. Akhsassi, M.,A. El Fathi, N. Erraissi, N. Aarich, A. Bennouna* , M. Raoufi, A. Outzourhit (2018) Experimental investigation and modeling of the thermal behavior of a solar PV module, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180, 271-279.
2. Aly, S.P., Ahzi, S., Barth, N. (2019) Effect of physical and environmental factors on the performance of a photovoltaic panel, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 1-9.
3. Arslanoglu, N.,Yigit, A., Eker, B. S.(2020) Investigation of wind speed effect on different mounted PV systems using satellite data, *Sustainable Energy*, 39,4, 1-10.
4. Bakirci, K. (2012) General models for optimum tilt angles of solar panels:Turkey case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,16,6149–6159. doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.009.
5. Barroso, J. S., Barth, N., Correia, J. P. M., Ahzi, S. ve Khaleel, M. A. (2016) A computational analysis of coupled thermal and electrical behavior of PV panels, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 148, 73-86. doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.004
6. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1974). *Solar energy thermal processes*. University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, Madison, WI.
7. Gökmen, N., Hu, W., Hou, P., Chen, Z., Sera, D. and Spataru S. (2016) Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations, *Renewable Energy*, 90, 283-290, 2016. doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.017
8. Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., and Ismail, I. M. (2017) Tilt and azimuth angles in solar energy applications–A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 147-168. doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.131
9. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, Erişim Tarihi: 11.12.2019, Konu: *Meteorolojik bilgi elde etmek*.
10. <https://www.mgm.gov.tr>, Erişim tarihi: 09.11.2019, Konu: *Meteorolojik bilgi elde etmek*.
11. <https://www.yegm.gov.tr>, Erişim tarihi: 05.11.2019, Konu: *Meteorolojik bilgi elde etmek*.
12. Işık, E., & Inallı, M. (2018). Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems approaches to forecast the meteorological data for HVAC: The case of cities for Turkey. *Energy*, 154, 7-16.
13. Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M. ve Poggi, P. (2005) Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences, *Applied Thermal Engineering*, 25,2854–2877. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.02.008
14. Skoplaki, E., Boudouvis, A.G., Palyvos J.A. (2008) A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 1393-1402.
15. Ulgen, K. ve Hepbasli, A., (2003) Comparison of the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for Izmir, Turkey, *Energy Sources*, 25, 637–649.
16. Vogt, M.R., Holstb, H., Wintera, M., Brendela, R. ve Altermatta, P.P. (2015) Numerical modeling of c-Si PV modules by coupling the semiconductor with the thermal conduction, convection and radiation equations, *5th International Conference on Silicon Photovoltaics, Silicon PV*.

17. Yıldırım, E ve Aktacir, M.A. (2019) Binaya entegre fotovoltaik sistemlerde azimut ve eğim açısı etkilerinin incelenmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2), 609-620.
18. Yiğit, A ve Atmaca, İ. (2018), *Güneş Enerjisi*, Dora Yayınevi, BURSA.

