

Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Parametrelerin DeneySEL Olarak İncelenmesi

Hacer AKHAN^{1*}, Enes İsmet EZİK¹ ve Sefa EMİRALİ¹

¹ Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne, TÜRKİYE

Makale Künye Bilgisi: Akhan, H., Ezik, E.İ., Emirali, S. (2025). Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Parametrelerin DeneySEL Olarak İncelenmesi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 26(1), 17-32.

Öne Çıkanlar

- PV panel yüzeyine gelen güneş ışınımını artırmak için eğim açısı optimum değerinde olmalıdır.
- Güneşten faydalanma oranı, güneş ışınları PV panel yüzeyine dik açıyla geldiğinde maksimumdur.
- Güneş ışınımı arttıkça üretilen güç artar, buna karşılık sıcaklık arttıkça güç üretimi azalır.

Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihçesi: Geliş: 18 Mayıs 2025 Kabul: 3 Haziran 2025	Günümüzde, tükenmekte olan konvansiyonel kaynakların yerine sonsuz enerji talebini karşılayacak yeşil enerji arayışı hala devam etmektedir. Ancak son otuz yıldır güneş enerjisinin elektrik enerjisi üretimine katkısındaki istikrarlı büyüme, güneş enerjisini uygulanabilir bir seçenek olarak gündeme getirmektedir. Ancak, düşük dönüşüm verimliliği nedeniyle fotovoltaik (PV) sistemlerden elde edilen güç düşüktür. Bu nedenle, güneş PV sisteminin verimliliğini artıran faktörler üzerinde bazı kritik analizlerin yapılması gerekmektedir. Bir fotovoltaik panel tarafından üretilen çıkış gücü birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden bazıları, fotovoltaik malzemesinin türü, alınan güneş ışınımının yoğunluğu, panel sıcaklığı, bulut ve diğer gölgeleme etkileri, invertör verimliliği, toz-kirlilik faktörü, panel oryantasyonu ve eğim açısı, hava koşulları, coğrafi konum, kablo kalınlığıdır. Çalışmada, fotovoltaik sistemlerinin performansını önemli ölçüde etkileyen güneş ışınımı, gölgeleme, eğim açısı faktörleri deneySEL olarak incelenmiştir.
Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi; Fotovoltaik; Enerji verimliliği; Elektrik üretimi.	

Experimental Investigation of Parameters Affecting Efficiency in Photovoltaic Systems

Article Info	Abstract
Article History: Received: May 18, 2025 Accepted: June 3, 2025	Today, the search for green energy to meet the never-ending demand for energy, rather than depleting conventional resources, is still ongoing. However, the steady increase in the contribution of solar energy to electricity generation over the last three decades has put solar energy on the agenda as a viable option. However, the power generated by photovoltaic (PV) systems is low due to low conversion efficiency. Therefore, some critical analyses need to be carried out on the factors that improve the efficiency of the photovoltaic system. The output power generated by a photovoltaic panel depends on many factors. Some of these factors are type of photovoltaic material, intensity of received solar radiation, panel temperature, clouds and other shading effects, inverter efficiency, dust pollution factor, panel orientation and tilt angle, weather conditions, geographical location, cable thickness. In the article, solar radiation, shading and tilt angle factors, which significantly affect the performance of photovoltaic systems, will be experimentally investigated.
Keywords: Solar energy; Photovoltaic; Energy efficiency; Electricity generation.	

1. Giriş

Dünya 2035 yılı toplam enerji arzında, mevcut politikalara göre 18 676 Mtep olması gerekirken, yeni politikalar senaryosuna göre, %8 azalma ile 17.197 Mtep olacağı tahmin edilmektedir. Dünya birincil enerji arzı 1990 yılında 8.779 Mtep olan toplam birincil enerji arzı geçen 20 yıl sonra %45 artarak 2010 yılında 12.730 Mtep olmuştur. Mevcut politikalara göre, 2035 yılında dünya birincil enerji arzı 2010 yılına göre, %47 artarak 18.676 Mtep'e, Yeni Politikalar Senaryosuna göre ise Dünya toplam birincil enerji arzı %35 artışla 17.197 Mtep'e yükseleceği tahmin edilmektedir (IEA, 2018).

Geleneksel yakıtların tükenme olasılığının yüksek olmasıyla birlikte artan enerji talebi ve çevrenin kirliliğine yönelik artan endişeler, araştırmacıları yenilenebilir enerjilerden yararlanmak için yeni çözümler geliştirmeye yöneltmiştir. Ayrıca, fosil yakıtların tüketimi, küresel ısınmayı artıran ve tüm yaşamı tehlikeye atan sera gazlarının salınımına neden olmaktadır. Tüm bu faktörler göz önünde bulundurulduğunda yenilenebilir enerjiler, yeterli ve aynı zamanda temiz enerji sağlayacak en iyi çözümlerden biridir. Mevcut yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, hidro, yakıt hücresi vb.dir. Bunlar arasında güneş enerjisi, artan talebi karşılamak için kirlilik içermeyen, umut verici ve güvenilir bir yeşil kaynaktır (Bushong, 2016; Muneer, 2003). Fotovoltaik (PV) sistem kullanılarak güneş ışınımından doğrudan güç elde edilebilir. PV sistem, fotovoltaik etki prensibini kullanarak güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürür. PV hücresine her ışık düştüğünde, fotondan gelen enerji yük taşıyıcılarına aktarılır. Daha sonra yük taşıyıcıları, bağlantı noktasındaki elektrik alanı nedeniyle pozitif yüklü deliklere ve negatif yüklü elektronlara ayrılır. Bu, bir yük bağlanarak devreye kapalı bir yol sağlanırsa akım akışıyla sonuçlanır (Photovoltaic Effect , 2010; Afzaal ve O'Brien, 2006).

Özellikle PV enerjisi sistemi kurmak büyük kapasiteli ve maliyetli bir yatırım ise, sistemi mümkün olduğunca verimli hale getirerek, yatırım getirilerini en üst düzeye çıkarmak önem kazanmaktadır. Fotovoltaik sistemin verimliliğini çevre veya hava koşulları, ekipman ve sistemin kurulumu, invertörün verimliliği, güneş ışınlarının atmosferde kat ettiği yolun uzunluğu ve havanın kirlilik boyutu, güneş ışınım yoğunluğu-yansıtılmış ışınların eklenmesi, güneş ışınlarının geliş açısı, PV hücre yapısında kullanılan malzemelerin cinsi ve niteliği, sıcaklık, güneşlenme süresi gibi faktörlerden etkilenebilmektedir. Sistem verimi artan sıcaklık ile azalmaktadır. PV sistemi ile elektrik üretmek için ihtiyaç duyulan kaynağın güneş ışınları olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, daha fazla güneş ışını daha yüksek sıcaklık anlamına gelir ve güneş ışığı miktarının gerekliliğine rağmen, sıcaklık PV panelin verimliliğini etkiler. Bir PV panelinin ideal sıcaklığı 300 K'dir. Sıcaklık 300 K'den fazlaysa, panel çıkışı her derece artışı için amorf hücreler için %0,25 ve kristalin için %0,4-%0,5 azalır. Güneş panelinin aşırı ısınmasını önlemek için pasif veya aktif soğutma sistemi kullanılarak bir soğutma sistemi kullanılır (Dubey vd., 2013; Moharram, 2013). Fotovoltaik etki, güneş ışınlarının doğrudan elektriğe dönüştürülmesidir ve panelin üzerine bir gölgeleme oluştuğunda çıkış gücü hemen etkilenebilmektedir. Gölgeleme, uçan kuş veya düşen yapraklar gibi geçici olabilir veya toz birikimi gibi zamanla artabilir (Dolara, 2013; Tanesab, 2016). Panelin düzenli olarak temizlenmesi ve ağaçlardan veya binalardan kalıcı gölgeleme olmadan kurulması çözüm olabilir (Dewi vd.,2016; Kumar vd., 2018). Diğer bir faktör kablo kalınlığıdır. Ev aletleri 220 V gerilimde çalışır iken, PV sistemi tarafından üretilen DC voltajı 12V-48V'dur, bu nedenle aynı watt için sistemde daha yüksek akım vardır ve bu nedenle direnç daha yüksek olur (Gan vd., 2014; Malamaki ve Demoulias, 2014).

Literatürde PV sistemlerde verimi etkileyen faktörler üzerine yapılmış çalışmalar yer almaktadır. 2011

yılında Kaldellis ve diğ. (Kaldellis, ve Fragos, 2011) karşılaştırmalı deneyler sonucunda güneş fotovoltaik panellerinin yüzeyinde toz birikmesi $0,4 \text{ mg/cm}^2$ 'ye ulaştığında, enerji %30 oranında azalır veya verimlilik saatte %1,5 oranında azalmıştır. Jiang ve diğ. (Jiang vd., 2011) deneyler sonucunda toz kirliliğinin güneş fotovoltaik modüllerinin enerji üretim verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu tespit etmiştir. Verimlilikteki düşüş, toz çökeltme yoğunluğu ile doğrusaldır. 2014 yılında Sulaiman ve diğerleri (Sulaiman, 2014) toz birikiminin ve farklı partikül türlerinin güneş pillerinin genel performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Toz birikintilerinin elektrik güç çıkışını önemli ölçüde azaltabileceğini bulmuşlardır. Qasem ve diğerleri (Qasem vd., 2014) toz birikiminin fotovoltaik modüllerin spektral geçirgenliği üzerindeki etkisini incelemiş ve analiz etmiştir. Küçük toz partiküllerinin fotovoltaik modüllerin ışık geçirgenliğini büyük partiküllere göre daha fazla azalttığını bulmuşlardır. Oh ve diğ. (Oh vd., 2020) fotovoltaik paneller ile ortam havası arasındaki sıcaklık gradyanının toz birikimi üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Yazdani ve diğerleri (Yazdani ve Yaghoubi, 2022), PV modül kirliliği hasar tahmininin hata boyutunu ve tozun PV güç üretimi üzerindeki etkisini değerlendirmek için kısa devre akım ölçüm yöntemini ve deneysel modeli kullanmıştır. Sonuçlar, fotovoltaik modüllerin günlük ortalama güç kaybının deney sırasında kısa devre akım kaybından yaklaşık %9 daha fazla olduğunu ve bu değer toz yoğunluğunun artmasıyla arttığını göstermektedir. PV panel güç düşüşü doğrusal değildir ve üstel modeller, PV modül kirlilik verimliliği kayıplarını tahmin etmede doğrusal ve güç fonksiyonu ilişkilerinden daha iyidir.

Sharma ve diğ., maksimum güç, performans oranı, verimlilik ve daha fazla spesifik üretim ve gelişmiş sistem verimliliği elde etmek için bir binadaki farklı yük senaryolarına dayalı bir güneş PV sistemini analiz etmiştir. Sistem, sabit eğim ve değişken azimut açılarına sahip bir laboratuvar yükü için test edilmiş ve

sistem sıfır azimut açısına sahip olduğunda, verimlilikte %1,7'lik bir artışla spesifik üretimin maksimum olduğu bulunmuştur (Sharma vd., 2018). Asgharzadeh ve diğ., modül yüksekliğinin, eğim açısının ve albedonun güneş PV dizilerinin enerji verimi ve iki yüzeyli kazancı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. 21'lik bir zemin albedosu ile büyük bir dizideki merkez modülün enerji üretiminin %7'ye kadar düşebileceği bulunmuştur (Asgharzadeh vd., 2018). Yakubu ve diğ., iki yüzeyli PV modüllerinden enerji üretimini artırmak için albedo eğim açısı ve modülün yerden yüksekliği gibi faktörlerin ayarlanması gerektiğini belirlemiştir. Farklı iklim koşullarında tek yüzlü modüllere kıyasla iki yüzlü modüllerde yıllık enerji veriminde yaklaşık %3,7 ila %4,3 artış olduğu sonucuna varılmıştır (Yakubu vd., 2022). Asgharzadeh ve diğ., mümkün olan en yüksek albedo değerinde ve yeterli yükseklikte kurulan modüllerin daha yüksek verimliliğe sahip olduğunu keşfetmiştir (Asgharzadeh, 2017). Ghenai ve diğerleri, RSM kullanarak eğim açısı, yükseklik ve albedonun iki yüzeyli güneş PV sistemlerinin performansı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Bulgular, iki yüzeyli PV enerji verimi ile albedo arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir (Ghenai vd., 2021). Stein ve diğ., iki yüzeyli PV modül sisteminin aynı yönelimli özdeş modüllerden daha fazla enerji ürettiğini gözlemlemiştir (Stein vd., 2018). Al-Turjman ve diğ., yaşam döngüsü tasarrufu 788 \$/yıl, geri ödeme süresi 10,9 yıl, NPV ve Uluslararası Getiri Oranı (IRR) sırasıyla 11000 \$ ve %10 civarında olan ve CO₂ emisyonu içermeyen sürdürülebilir bir çevre sağlayan bir sistem önermiştir (Al-Turjman vd., 2020). Jang ve diğ., yansıtıcı malzemenin boyutunu, dikey kurulumu, sıcaklık uyumsuzluğu için modüllerin konumunu ve PM konsantrasyonunu değiştirerek iki yüzeyli bir PV modülünü ve iki yüzeyli bir PV sistemini denemek için üç test yatağı kullanmıştır. İki yüzeyli kazanç, PM10 konsantrasyonu 100 g/m³ değiştiğinde açık gökyüzü koşullarında %4 artmıştır. PM 10 konsantrasyonu

bulutlu koşullarda 100 g/m³ değiştiğinde, çift yüzeyli kazanç %0,9 düşmüştür (Jang ve Lee, 2020). Sreenath ve diğ., zemin yüzeyine yüksek albedo faktörüne sahip iki yüzeyli bir güneş PV modülü kurmanın enerji çıkışını en üst düzeye çıkarmak için uygun olduğunu belirlemiştir. En düşük 0,15 albedo faktörünün yıllık 164,5 MWh enerji sağlayacağı tahmin edilmektedir. En yüksek 0,85'lik bir albedo faktörünün yıllık 175,8 MWh enerji üreteceği tahmin edilmektedir (Sreenath, 2021). Sanchez ve diğ., açıklık yüksekliği, albedo, eğim ve azimut açısının iki yüzeyli PV enerji hesaplaması üzerindeki etkisini araştırmak için mevcut algoritmaları kullanmıştır (Sanchez vd., 2022). Birçok araştırmacı işletim ve tasarım parametrelerini optimize etmek için RSM kullanmıştır. Varun ve diğ., iki yüzeyli modüllerin dikey ve enlem montajındaki performansını incelemek için PVsyst'i kullanmış ve enlem eğimli iki yüzeyli bir panelin dikey olarak yönlendirilmiş bir N-S panelden 1000 kWp daha fazla ürettiğini belirlemiştir (Manikandan vd., 2020). Osmani ve diğ., güneş PV eğim açısı değişiminin PV ağının maliyet etkinliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, Tripoli, Belfort ve Tantan için sırasıyla seviyelendirilmiş enerji maliyetinin %4,32, 3,73 ve 4,35 oranında azaldığını ve üretilen gücün %49,67, 50,36 ve 26,83 oranında arttığını, güç maliyetinin ise %4,43, 4,48 ve 4,47 oranında düştüğünü göstermiştir (Osmani vd., 2021). Kamalapur ve diğ. Hindistan'daki kırsal elektrifikasyonun özelliklerini ve güneş PV ev sistemlerinin fizibilitesini değerlendirmiştir (Kamalapur ve Udaykumar, 2011).

Yapılan çalışmada, Edirne iklim koşulları için PV panel verimini etkileyen parametreler deneysel olarak incelenmiştir. Saha çalışmalarında ölçülen veriler kullanılarak, sistemin hangi koşullarda daha yüksek verimle çalıştığı tespit edilmiş, optimum çalışma parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular, Edirne ve benzer iklim özelliklerine sahip iklim bölgeleri için önemlidir.

2. Teorik Bilgiler ve Deneysel Çalışmalar

Fotovoltaik sistemlerde verimi etkileyen parametreleri Edirne iklim koşulları için saha uygulamaları ile belirlenmesi ve performans analizi yapılması amacı ile teorik analiz, kontrollü veri alma, deneysel analiz ve sonuçların değerlendirilmesi aşamaları gerçekleştirilmiştir. Teorik analiz kapsamında güç ve verim hesaplamaları yapılmıştır. Kontrollü veri alma ve ölçme aşamasında Teorik analiz yapıldıktan sonra mevcut PV sistem üzerinde kontrollü ölçümler yapılmış, sistem özellikleri tespit edilmiştir. Ölçme işlemleri için çok fonksiyonlu ölçüm cihazları kullanılmıştır. Deneysel analizde Sistemden ölçülen gerçek veriler ile hesaplamalar yapılmış ve sistem performansı tespit edilmiştir. Deneysel analiz sonuçları değerlendirilmiş ve sistemde yapılabilecek iyileştirmeler önerilmiştir.

2.1. PV Panel Verimini Etkileyen Faktörler

Tablo 1'de PV panel verimini etkileyen iklim ve coğrafi konum, sistem özellikleri, çevresel ve meteorolojik koşullar yer almaktadır. Ayrıca, üretimdeki farklılıklar nedeniyle aynı tip fotovoltaik panellerin elektriksel özellikleri değişiklik gösterebilir. Modüller arasındaki bu farklar, performans kayıplarına neden olabilir.

Tablo 1. PV sistem verimini etkileyen faktörler

PV sistem verimini etkileyen faktörler	
Sistem Özellikleri	PV hücre malzemesi
	Şarj kontrolörünün I-V karakteristikleri üzerindeki etkileri
	İnvertör verimi
	Akü verimi
	PV panel eğim açısı, azimut açısı
	Kablo direnci
	PV panel sıcaklığı
	PV panelin yaşı ve degradasyon oranı
Coğrafi konum, çevresel ve meteorolojik koşullar	Gölgeleme faktörü
	Güneş ışınlama ve güneşlenme süresinin etkisi
	Kirlilik faktörü
	Hava sıcaklığı, rüzgar hızı
	Kurulumun yapıldığı lokasyon

2.1.1. PV hücre malzemelerinin cinsi ve niteliği

PV hücre yapısını oluşturan silikon maddenin tek kristalli veya çok kristalli olmasına ya da hücrenin yapısında kullanılan maddenin özelliğine göre de verim değişmektedir. PV panel malzemelerinden Polikristallerde %13-16, monokristallerde %18-24 verimlilik ve ince filmlerde %7-13 verimlilik görülmektedir.

2.1.2.Şarj kontrolörünün I-V karakteristikleri üzerindeki etkileri

Şebekeden bağımsız sistem, panellerin aküye bağlanmasını gerektirir ve üretilen voltaj akünün standart voltajına ayarlanacaktır. Bu nedenle, akünün her zaman tam şarjlı durumda olması istenir; ancak bu akünün normal durumu değildir. Bataryayı maksimum voltaj oranında tutmak için, sistem verimliliğini artırmak amacıyla bir MPPT (Maksimum Güç Noktası İzleme) Şarj Kontrol Cihazı gereklidir. MPPT, PV panel voltajını her zaman maksimum güç noktasına yakın tutmaya çalışarak çok az güç kaybıyla DC'den DC'ye voltaj dönüştürücü olarak da işlev görür.

2.1.3. İnvertör veriminin etkisi

PV sistemi DC gerilim üretirken ev aletlerinin çoğu AC yüklerdir. Bu nedenle bir invertöre ihtiyaç vardır. İnvertör verimliliği %80-90 civarındadır. Şebekeye bağlı bir sistem için invertör doğrudan şebekeye bağlanır ve maksimum güç noktasını (MPP) takip etmesi ve DC akımını şebekenin AC akımına dönüştürmesi gerekir. Bu dönüşüm, şebeke ile aynı voltaj ve frekansta olması için senkronizasyon gerektirir. Aşırı ısınan invertör üretilen gücü azaltacaktır.

2.1.4. Akü veriminin etkisi

Şebekeden bağımsız sistem, bir PV sisteminin dalgalanan üretilen gücü nedeniyle yedek depolama gerektirir. Çünkü PV sisteminin güç üretimi büyük

ölçüde PV panellerine ne kadar ışınlım düştüğüne bağlıdır. Bir akünün ömrü PV panellerin ömrünün çok altındadır. Bu nedenle akü, PV sistemi daha pahalı hale getiren bir faktördür.

100 amperlik bir sulu akünün kullanım kapasitesi %50 seviyesindeyken, aynı kapasitedeki jel akünün kullanım kapasitesi %80'ler seviyesindedir (isosenerji.com/gunes-enerjisi). Akü kayıpları yaklaşık %10 civarındadır (Öztürk ve Dursun, 2011).

2.1.5. PV panel eğim açısı, azimut açısı

Bilimsel çalışmalar incelendiğinde (Duffie, vd., 2013; Wald, 2021; Grygiel vd., 2021; Winter vd., 1991; Cooper, 1969; Liu vd., 2024; Ruan vd., 2024; Vasilakopoulou, 2023; Barbón vd., 2022), fotovoltaik modülün verimliliğinin büyük ölçüde eğim açısına bağlı olduğu görülmektedir. Bazı çalışmalarda eğim açısı matematiksel ifadelerle temsil edilmektedir. Eğim açısının değeri, modülün türüne, iklim bölgesine, güneş radyasyonunun yoğunluğuna, hava koşullarına ve modülün kurulduğu coğrafi enleme bağlı olarak değişmektedir.

Yılın her günü için PV panelin optimum eğim açısı yerel olarak Denklem 1 ile hesaplanmaktadır (Senpınar, 2018).

$$Eğim\ Açısı\ (\alpha) = 90^\circ - \beta N \quad (1)$$

βN güneş yükseklik açısı Denklem 2, deklinasyon açısı δ Denklem 3 ile ifade edilmektedir. L kurulum yapılan sahanın enlem açısı, n 1 Ocak'tan itibaren gün sayısıdır (Senpınar, 2018).

$$\beta N = 90^\circ - L + \delta \quad (2)$$

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (3)$$

2.1.6. Kablo Direncinin Etkisi

Kablolar elektrik sisteminde enerji kayıplarının kaynaklarından biridir. PV sisteminde, kablolardan kaynaklanan kayıplar PV panelleri dizisindeki DC kayıpları ve bir invertörün çıkışındaki AC kayıplarıdır. Bir kablodaki gerilim düşüşü Denklem 4 ile hesaplanır (Dewi vd., 2018).

$$\Delta V = b \left(\rho_1 \frac{L}{S} \cos \varphi + \lambda L \sin \varphi \right) I_B \quad (4)$$

Burada V gerilim (3 faz için faz-faz gerilimi ve tek faz için faz-nötr gerilimi) ve ΔV gerilim düşüşü, b kablo uzunluk faktörü, L kablo uzunluğu, S mm cinsinden kablo kesiti, $\cos \varphi$ güç faktörü ve $\sin \varphi = \sin(\arccos(\cos \varphi))$, λ uzunluk birimi başına reaktans, I_B amper cinsinden akım ve ρ_1 belirli bir sıcaklık için ohm.mm²/m cinsinden özdirençtir. ρ_1 , Denklem 5 ile hesaplanır (Dewi vd., 2018).

$$\rho_1 = \rho_0 (1 + T_C (T_1 - T_0)) \quad (5)$$

Denklem 8'de ρ_0 , T_0 'daki direnç ($T_0 = 20^\circ\text{C}$); T_C , $^\circ\text{C}$ cinsinden derece başına sıcaklık katsayısıdır. T_1 ise kablo sıcaklığı (varsayılan değer 100°C 'dir). Kablo ısınması uygulamada kaçınılmazdır, ısı kablunun direncini artırır ve sonuçta enerji kayıplarına neden olur. Dirençli ısıtma nedeniyle bir kablodaki enerji kayıpları aşağıdaki Denklem 6 ile ifade edilir (Dewi vd., 2018).

$$E = a \times R \times I_B^2 \quad (6)$$

Burada E kablolardaki enerji kaybı (Watt), a hat katsayısı sayısıdır (tek fazlı devre için $a = 1$ ve 3 fazlı devre için $a = 3$). R, Denklem 7 ile ifade edilen dirençtir (Dewi vd., 2018).

$$R = b \times \rho_1 \times \frac{L}{S} \quad (7)$$

2.1.7. PV panel sıcaklığın etkisi

PV panel bir dizi güneş enerjisinden oluşur ve PV panel malzemesi bir yarı iletkenidir. Yarı iletken cihazlar,

soğuma sırasında yalıtkan, ısınma sırasında ise iletken olarak hareket edeceğinden sıcaklık değişimlerine karşı hassastır. Bununla birlikte, optimum güç çıkışı üretmek için sıcaklık standardı 300 K veya yaklaşık 25°C 'dir. Bir silikon PV panel aşırı ısındığında, daha fazla akım ve daha az voltaj üretir, voltaj düşüşü meydana gelir ve üretilen güç azalır. Maksimum nokta gücü, akım ve gerilim Denklem 8 ile hesaplanır (Dewi vd., 2018).

$$P_{mp} = I_{mp} \times V_{mp} = FF \times I_{SC} \times V_{OC} \quad (8)$$

Denklem 11'de, P_{mp} maksimum güç, I_{mp} maksimum akım, V maksimum gerilim, FF dolum faktörü, I_{SC} kısa devre akımı ve V_{OC} açık devre gerilimidir.

IV-Eğrisi akım (I) ve gerilim (V) ile tanımlanır. I ve V ideal bir diyot olarak PV panel modellemesi ile ilgilidir ve PV panel tarafından üretilen maksimum akım ve voltajdır. Her ikisi de çalışma noktasındaysa, üretilen güç sıfırdır. I ve V'yi birbirine bağlayan parametre FF olarak adlandırılır ve PV panel tarafından üretilen maksimum gücü belirler. Denklem 9, PV hücrenin verimini ifade etmektedir (Dubey vd., 2013).

$$\eta_{cell} = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_{cell} - T_{ref})] \quad (9)$$

$$T_{cell} = T_{amb} + (0.0256 \times I) \quad (10)$$

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}} \quad (11)$$

Burada η_{cell} uygulanan bir PV modülünün net verimliliği, $\eta_{T_{ref}}$ referans sıcaklıktaki T_{ref} PV modül verimliliği, β_{ref} sıcaklık katsayısı, T_{cell} mevcut PV panel sıcaklığı, T_{amb} ortam sıcaklığı, T_0 PV panel verimliliğinin sıfır olduğu en yüksek sıcaklıktır.

Aşırı ısınan güneş panellerinden kaynaklanan verimlilik ve çıkış düşüşü, PV panellerin ortam sıcaklığı 300K'ya kadar soğutulmasıyla aşılabılır. PV panelleri soğutma yöntemleri pasif ve aktif soğutma yöntemleridir. Pasif soğutma yöntemi, PV paneller üzerinde soğuk rüzgarın esmesine izin vermek veya farklı kaburga açılara sahip bir ısı emicinin kurulması

gibi güç tüketmeden PV panelleri doğal olarak soğutmaktır. Aktif soğutma yöntemi, PV panellerini soğutmak için ek cihazlar kullanılarak gerçekleştirilir, örneğin panellerin üzerine su akıtmak için bir pompa kullanmak gibi. Bu nedenle bu yöntem güç tüketir.

2.1.8. PV Panelin yaşı ve degradasyon oranı

Degradasyon, güneş panelinin zamanla elektrik üretme kapasitesinin azalmasıdır. Her yıl panelin verimliliği az da olsa düşer. Bu düşüş, yapısal yıpranma, UV ışınları, sıcaklık döngüleri, nem ve çevresel etkiler gibi nedenlerden kaynaklanır.

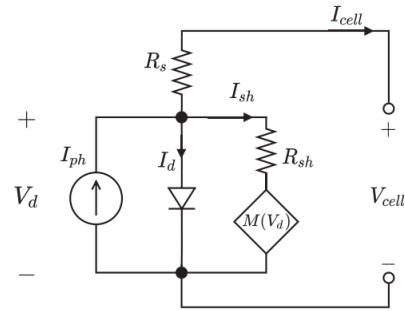
Ortalama degradasyon oranları, Monokristal ve PERC paneller için yılda yaklaşık %0.3 – %0.5, polikristal paneller için yılda yaklaşık %0.5 – %0.8, ince film paneller için yılda yaklaşık %1 – %1’dir.

2.1.9. Gölgeleme faktörü

PV sistemi kullanılarak elektrik üretimi hava koşullarından doğrudan etkilenir. Güneşli günlerde, üretilen güç maksimum olacaktır ve ani bulut gölgelemesi PV sistem verimliliğini ve çıktısını azaltacaktır. Gölgeleme faktörü, PV panellerine gelen güneş ışınımını engelleyen herhangi bir şeye genişletilir. Gölgeleme, zamanla sistemin verimliliğini azaltacak olan birikmiş tozdan kaynaklanabilir. Kısmi gölgeleme PV panellerin üretimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gölge hücre, gölgesiz hücreler tarafından üretilen elektrik gücünü emer ve bu durum PV panellere zarar verebilecek sıcak noktalara neden olur.

Gölgeleme etkisi, güç kayıplarını değerlendirmek için Bishop Modeli ile modellenmiştir. Şekil 1’de yer alan Bishop modelinin devre şeması, Tek Diyotlu Model kullanılarak oluşturulan PV hücre modelini içerir. Tek Diyotlu Model, foto-indüklenmiş akım I_{ph} , yarı-iletken malzeme (Shockley diyot ile temsil edilir) ve R_s ve R_{sh} dirençleri ile gösterilen dönüşüm enerji kayıplarını

içerir. R_s bir hücre seri direnci ve R_{sh} hücre kısa devre direncidir.



Şekil 1. Bishop PV hücre modeli

Bishop modeline göre, ters çalışma modu I_{sh} ile gösterilen R_{sh} direncinden geçen akıma bağlıdır (Restrepo-Cuestas ve Montano, 2024). Bu nedenle, I_{sh} akımını diyot gerilimi (V_d) ve yarı iletken malzemenin kırılma (zener) gerilimi (V_{br}) arasındaki ilişkiyle ilişkilendiren a adlı bir omik faktör içerir. Ek olarak, m adında bir eğri uydurma faktörü içerir. PV hücre çıkış akımı (I_{cell}) Eşitlik (12)’de gösterildiği gibi hesaplanabilir, burada I_d diyot gerilimine bağlı olan diyottan geçen akımdır ($V_d = V_{cell} + I_{cell}R_s$); I_{sat} doyumluk akımını gösterir ve n idealite faktörüdür. Elektron yükü olarak $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ m² kg/s², K Boltzmann sabiti ve T Kelvin (K) cinsinden PV hücre sıcaklığını gösterir. I_d diyot gerilimi Denklem 13 ile, I_{sh} Denklem 14 ile ifade edilir (Restrepo-Cuestas ve Montano, 2024).

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (12)$$

$$I_d = I_{sat} \left[e^{\left[\frac{q(V_{cell} + I_{cell}R_s)}{nkT} \right]} - 1 \right] \quad (13)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{cell} + I_{cell}R_s}{R_{sh}} \left[1 + a \left(1 - \frac{V_{cell} + I_{cell}R_s}{V_{br}} \right)^{-m} \right] \quad (14)$$

Eşitlik 15, 16 ve 17, I_{cell} ile PV hücre voltajı (V_{cell}) arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını, üstel bir fonksiyon ile ilişkilendirildiğini göstermektedir.

2.1.10. Güneş ışınlamı ve güneşlenme süresinin etkisi

Kurulum yapılan lokasyonun güneş enerjisi potansiyeline bağlı olarak güneş ışınlamı arttıkça verim artmaktadır. Güneşlenme süresi, bir bölgenin gün boyunca doğrudan güneş ışığı aldığı zaman dilimini ifade eder. Güneşlenme süresi arttıkça, panelin güneş enerjisi toplama kapasitesi artar.

2.1.11. Kirlilik faktörü

PV modüllerinin yüzeyinde toz birikmesi, PV dönüşüm verimliliğindeki düşüşün başlıca nedenlerinden biridir (Cabrera-Tobar vd., 2016). Partikül boyutu ve tozun kimyasal bileşimi PV modül performansını etkiler ve toz özelliğinin PV hücrelerinin performansı üzerindeki etkisi göz ardı edilemez (Piedra vd., 2018). Toz birikimi, PV modülünün yüzeyinden dağınık radyasyonun yansımaya, saçılmasına ve iletimine yol açarak PV paneline ulaşan güneş radyasyonu miktarını azaltır (Yao vd., 2022; Xu vd., 2020). Güneş radyasyonu PV modülünü ısıtladığında, bir kısmı elektrik enerjisine dönüştürülür ve diğer bir kısmı da ısıya dönüştürülerek PV modülünün sıcaklığının artmasına neden olur (Browne, 2016). Yüksek modül sıcaklıkları PV modül performansını önemli ölçüde düşürür (Zakharchenko vd., 2004; Zhang vd., 2012) ve tozun varlığı sıcaklığı daha da artırarak bu sorunu daha da kötüleştirir (Gostein vd., 2013; Dahliou, 2022).

2.1.12. Hava sıcaklığı, rüzgar hızı

Sıcaklık etkisi panellerin olduğu fotovoltaik hücrelerin yarı iletken olmasından kaynaklanmaktadır. Sıcaklık yarı iletken malzemedeki akım geçişine doğrudan etki etmektedir. Düşük sıcaklık verimi olumsuz etkilemezken yüksek sıcaklıklar verimi olumsuz yönde etkilemektedir.

Rüzgar panel üzerindeki tozun birikiminde önemli rol oynar, Rüzgarın esme yönü ve hızı tozun panel üzerinde kalıp kalmayacağını belirler. Aynı zamanda

hızlı esen rüzgarlar sayesinde panel yüzey sıcaklığı da düşmektedir. Bu da panelin verimini artırmaktadır.

2.1.13. Kurulumun yapıldığı lokasyon

Güneş panelleri, doğrudan güneş ışığına bağlı olarak çalıştığından, panelin kurulduğu yerin konumu direkt verime etki eder. Enlem, yani dünyanın ekvatora olan uzaklığı, bir bölgenin güneş ışınlamını yıl içinde ne kadar dik aldığı ile ilgilidir. Ekvatora yakın bölgelerde güneş ışınlamı daha dik geldiği için enerji verimi daha yüksek olur. Yükseklik arttıkça atmosferin yoğunluğu azalır, bu da güneş ışınlamının daha az kırılması demektir. Aynı zamanda hava kirliliği ve nem oranı da düşer, bu da ışığın daha doğrudan panele ulaşmasını kolaylaştırır.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Deneyler Edirne iklim koşullarında yapılmıştır. Edirne, 41°- 40° kuzey paraleli ve 26°- 34° doğu meridyeni arasında yer almaktadır (www.edirne.bel.tr, 2025) ve 6.098 km² yüzölçümüyle deniz seviyesinden yaklaşık 41 metre yüksektir. Şehir bulunduğu konum itibarıyla hem Akdeniz iklimi hem de Orta Avrupa'ya özgü olan karasal iklimin etkisi altında kalan bir geçiş bölgesidir. Yaz döneminde 30 °C'nin altına düşmeyen sıcaklıklarla, haziran ayında m² 'ye düşen en yüksek ışınlam değerlerine ulaşırken, temmuz ayında ise en uzun güneşlenme süresi görülmektedir.

PV sistem, Merkez/Edirne lokasyonuna şebekeden bağımsız olarak kurulmuştur. 24 V, 280 W gücünde polikristal PV panel, 30 A'lık şarj kontrol cihazı, 1200 W 24 V'luk invertör ve aküler sistem elemanlarını oluşturmaktadır. 12 V ve 100 Ah'lık 2 adet jel akü birbirine seri bağlanmıştır. Tablo 2'de PV panel teknik özellikleri yer almaktadır.

Tablo 2. PV panel teknik özellikleri

Özellik	Değer
Hücre Tipi	Polikristal
Hücre dizilişi	60 (60x1)

Boyutlar	1640x990x35 mm
Ağırlık	19 kg
Ön kaplama	3,2 mm temperli cam
Çerçeve malzemesi	Alaşımlı alüminyum
J-box	IP67
Kablo	4 mm ² (IEC)/12AWG(UL), 900 mm
Nominal Max. Güç	280 W
Optimum Çalışma Gerilimi	31,2 V
Optimum Çalışma Akımı	8,97 A
Açık Çevrim Gerilimi (Voc)	37,8 V
Kısa Çevrim Akımı (Isc)	9,50 A
Modül verimi	%19
Çalışma Sıcaklığı	-40°C~+85°C
Güç Toleransı	0 ~ 5 W

Test sahasında yapılan deneysel çalışmalarda PV panel eğim açısı 0°, 10°, 20°, 30° ve 40° eğim açılarında farklı hava koşullarında test edilmiştir. Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da farklı eğim açıları için güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalıştırılan PV paneller görüntülenmiştir.



Şekil 2. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 40° eğim açılı PV panel



Şekil 3. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 30° eğim açılı PV panel



Şekil 4. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 20° eğim açılı PV panel



Şekil 5. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 10° eğim açılı PV panel

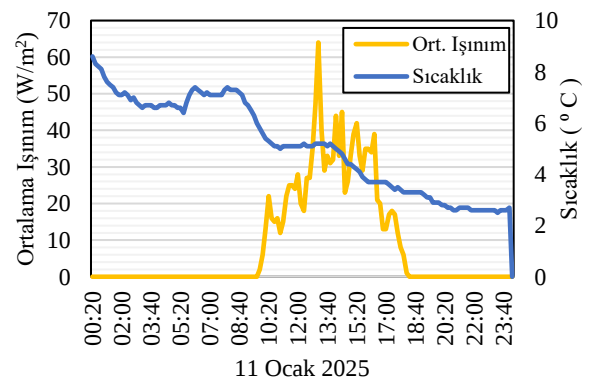


Şekil 6. Güneşli, gölgeli ve karlı hava koşullarında çalışan 0° eğim açılı PV panel

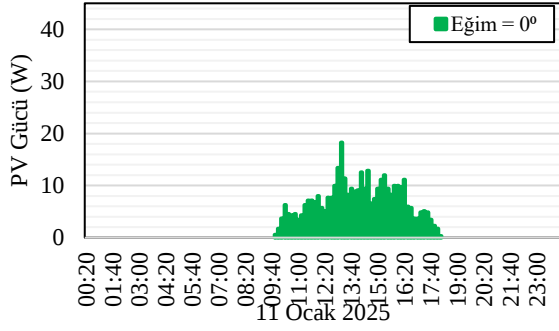
Deneysel çalışmalar boyunca, Trakya Üniversitesi meteoroloji istasyonu ile kurulum yapılan alandaki güneş ışınlamı, dış ortam sıcaklığı, rüzgar hızı ve yönü, dış ortam nem değeri 7 gün 24 saat her türlü hava koşulunda kesintisiz olarak ölçülmüştür.

3. Bulgular ve Tartışmalar

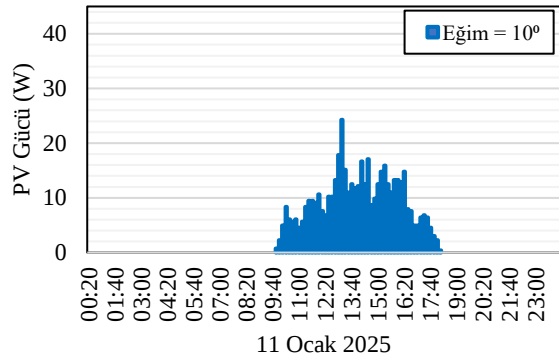
Şekil 7'de 11 Ocak 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışınlamı ve hava sıcaklığı değişimi verilmiştir. 11 Ocak 2025 için Şekil 8'de 0° eğim açılı, Şekil 9'da 10°, Şekil 10'da 20°, Şekil 11'te 30° ve Şekil 12'de 40° için PV panelin ürettiği elektrik gücü değişimi yer almaktadır.



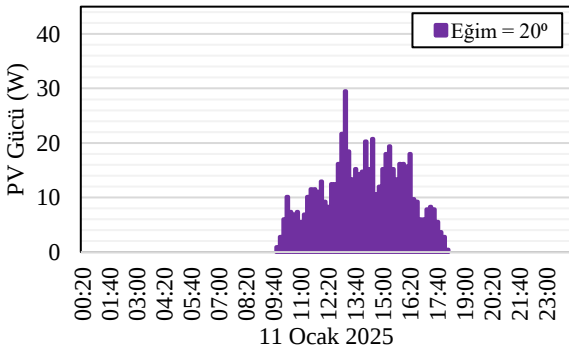
Şekil 7. 11 Ocak 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışınlamı ve hava sıcaklığı değişimi.



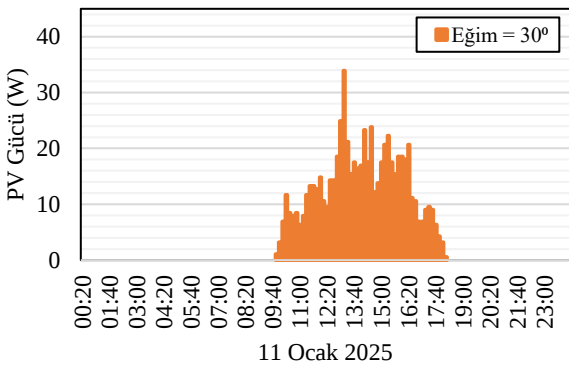
Şekil 8. 11 Ocak 2025 için 0° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü



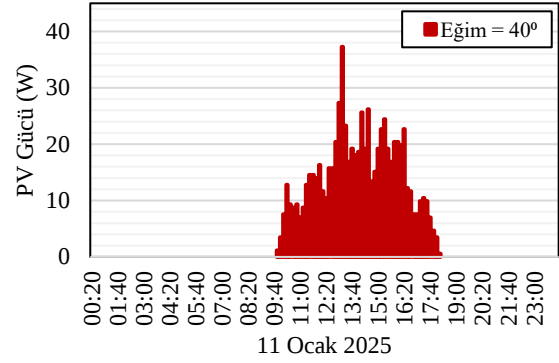
Şekil 9. 11 Ocak 2025 için 10° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü



Şekil 10. 11 Ocak 2025 için 20° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü

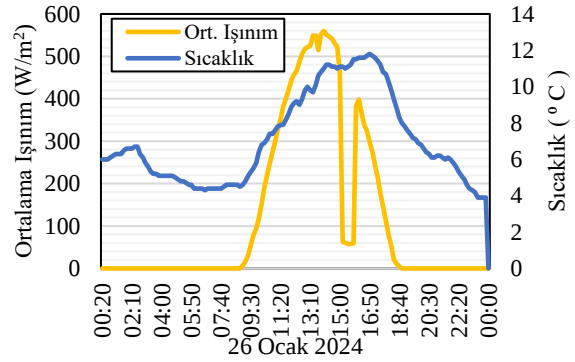


Şekil 11. 11 Ocak 2025 için 30° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü

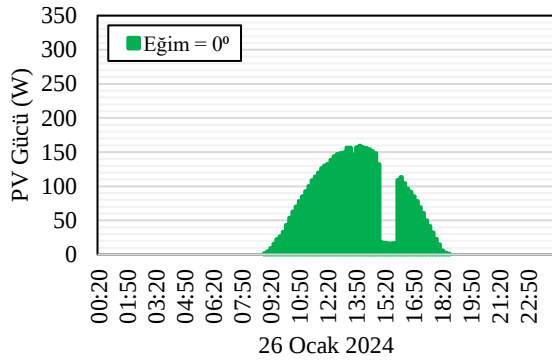


Şekil 12. 11 Ocak 2025 için 40° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü

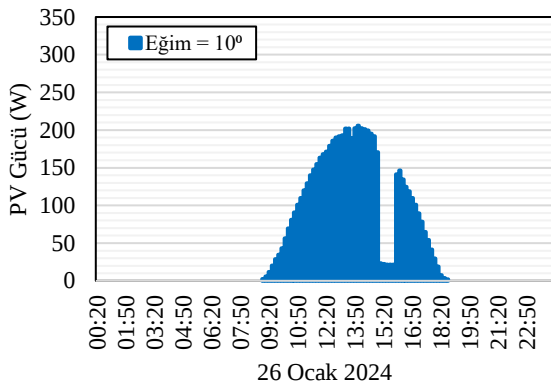
Şekil 13'te 26 Ocak 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışıınımı ve hava sıcaklığı değişimi verilmiştir. 26 Ocak 2025 için Şekil 14'te 0° eğim açılı, Şekil 15'te 10°, Şekil 16'da 20°, Şekil 17'de 30° ve Şekil 18'de 40° için PV panelin ürettiği elektrik gücü değişimi yer almaktadır. Öğleden sonra 15.00-15.40 aralığında panel gölge etkisinde kalmış ve üretilen güç yaklaşık olarak 6 kat azalmıştır. Gölgeleme faktörünün enerji üretimine etkisi büyüktür. Güneş ışıınımı arttıkça doğru orantılı olarak güç üretimi de artmaktadır.



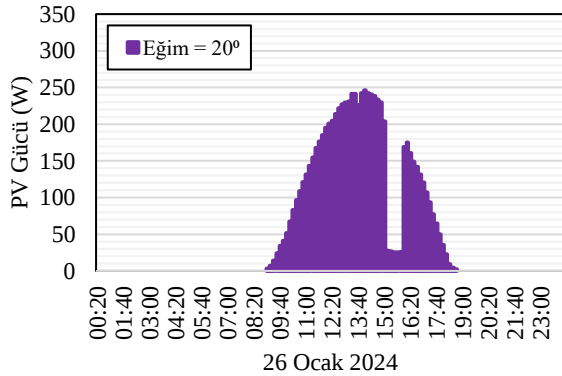
Şekil 13. 26 Ocak 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışıınımı ve hava sıcaklığı değişimi (Gölgeli ortam koşulunda)



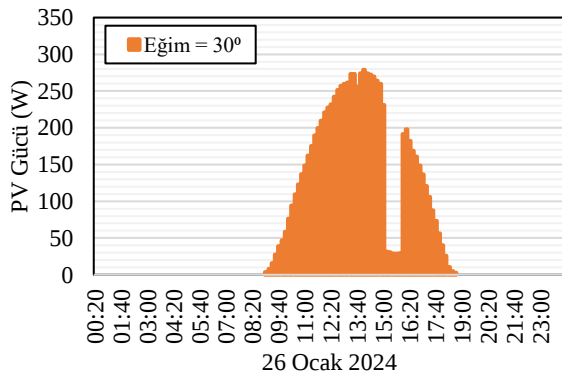
Şekil 14. 26 Ocak 2025 için 0° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)



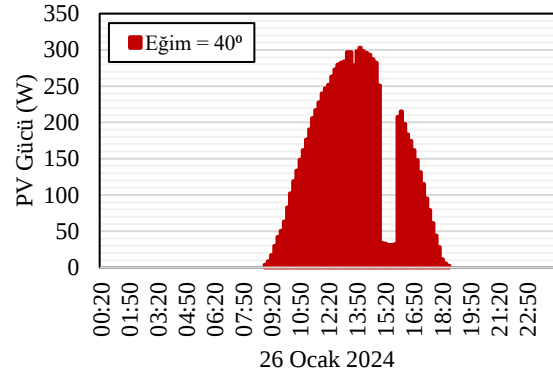
Şekil 15. 26 Ocak 2025 için 10° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)



Şekil 16. 26 Ocak 2025 için 20° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)



Şekil 17. 26 Ocak 2025 için 30° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)



Şekil 18. 26 Ocak 2025 için 40° eğim açılı PV panelin ürettiği elektrik gücü (Gölgeli ortam koşulunda)

4. Sonuçlar

Geleneksel fosil yakıtların azalması ve küresel ısınmaya yol açan hava kirliliğinin artması konusunda hükümet ve insanların bilinçlenmesi nedeniyle PV sistemlerinin geliştirilmesi ve kurulması hızla artmaktadır. PV Sistemi, Edirne gibi yıl boyunca uzun süre güneş ışığı alan bir şehir için en iyi alternatiftir. Bununla birlikte, PV enerji santralinin çıktısı ve verimliliği hala minimum düzeydedir. Silikon bazlı güneş panelleri için en iyi verimlilik teorik olarak %29 iken gerçekte %27'den azdır. Bu düşük verimlilik, PV sistemine kurulan her bileşenin diğer kayıplardan sorumlu olması nedeniyle daha az verimli hale gelmektedir. Verimliliğe ve çıkış kayıplarına katkıda bulunanlar, PV panellerin ortam sıcaklığının ötesindeki yüzey sıcaklığı, toz gölgeleme ve cihazların verimliliğine yedek depolama için batarya, yani invertör, kablo direnci ve şarj kontrolörüdür. PV panellerin sabit eğim açısı, paneller tarafından üretilen elektrik miktarını doğrudan etkiler, bu nedenle PV yüzeyine gelen güneş ışınımını artırmak için eğim açısı optimum değerde olmalıdır. Verimlilik sorunlarına rağmen PV sistemler, güneş ışınımının sınırsız ve çevre dostu olması nedeniyle Edirne'de ve çevresindeki uzak bölgelerde bir enerji santrali için hala en iyi alternatiftir. Yapılan deneysel çalışmalara göre Aralık ve Ocak ayı Edirne iklim koşulları için en yüksek güç üretimi PV panel eğim açısı 40° için elde edilmiştir. Güneş ışınımı

arttıkça üretilen güç artmış, buna karşılık sıcaklık arttıkça güç azalmıştır. Gölgeleme etkisindeki panelde güç üretimi azalmaktadır.

Teşekkür

Trakya Üniversitesi Rektörlüğüne mali desteklerinden dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar Çatışması: Yazarların beyan edilecek herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Veri Paylaşım Bildirimi: Veriler makul talepler üzerine paylaşılabılır.

Yazar Katkıları: Kavram: H.A., Tasarım: H.A., Uygulama: H.A., E.İ.E., S.E., Malzeme temini: TÜBAP, Veri toplama: H.A., Veri analizi/yorumlanması: H.A., E.İ.E., S.E., Yazım: H.A., Eleştirel değerlendirme: H.A.

Mali Destek: Bu çalışma, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (TÜBAP) tarafından Öğrenci Bilimsel Araştırma Desteği ile finanse edilmiştir (Proje No: TÜBAP-2024/202).

ORCID

Hacer Akhan, 0000-0002-7896-6441

Enes İsmet Ezik, 0009-0002-2973-3251

Sefa Emirali, 0009-0009-4165-2121

Kaynaklar

Afzaal, M., O'Brien, P. (2006). Recent developments in II–VI and III–VI semiconductors and their applications in solar cells, J Mater Chem, 17.

Al-Turjman, F., Qadir, Z., Abujubbeh, M., Batunlu, C. (2020). Feasibility analysis of solar photovoltaic-wind hybrid energy system for household applications, Comput Electr Eng, 86. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106743>.

Asgharzadeh, A.. (2017). Analysis of the impact of installation parameters and system size on bifacial gain and energy yield of PV systems. In: Proceedings of the IEEE 44th photovoltaic specialist conference, 3333–8. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2017.8366690>.

Asgharzadeh, A., Marion, B., Deline, C., Hansen, C., Stein, J.S., Toor, F. (2018). A sensitivity study of the impact of installation parameters and system configuration on the performance of bifacial PV arrays, IEEE J Photovoltaics, 8(3), 798–805. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2819676>.

Barbón, A., Ghodbane, M., Bayón, L., Said, Z. (2022). A general algorithm for the optimization of photovoltaic modules layout on irregular rooftop shapes. Journal of Cleaner Production, 365, 132774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132774>

Browne, M.C., Norton, B., McCormack, S.J. (2016). Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM, Sol Energy, 133, 533–48. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.024>.

Bushong, S. (2016). Advantages and disadvantages of a solar tracker system, Sol Power World 2016.

- Cabrera-Tobar A, Bullich-Massagué E, Aragüés-Penalba M, Gomis-Bellmunt O. (2016). Topologies for large scale photovoltaic power plants. *Renew Sustain Energy*, 59, 309–19. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.362>.
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills, *Solar Energy*, 12 (3), 333–346. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(69\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0038-092x(69)90047-4)
- Dahlioui, D., Laarabi, B., Barhdadi, A. (2022). Review on dew water effect on soiling of solar panels: towards its enhancement or mitigation, *Sustain Energy Technol Assessments*, 49, 101774. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101774>.
- Dewi, T., Risma, P., Oktarina, Y., Roseno, M.T., Yudha, H.M., Handayani, A.S., Wijanarko Y. (2016). A Survey on Solar Cell; The Role of Solar Cell in Robotics and Robotics Application in Solar Cell Industry in Proc Forum in Research, Science, and Technology FIRST C19-C22.
- Dewi, T., Risma, P., Oktarina Y. (2019). Review of Factors Affecting the Efficiency and Output of a PV System Applied in Tropical Climate, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 258, 012039.
- Dolara, A., Lazaroiu, G.C., Leva, S., Manzolini, G. (2013). Experimental investigation of partial shading scenarios on 2013.
- Dubey, S., Sarvaiya, J.N., Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review, *Energy Procedia*, 33, 311– 321.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
- Gan, C.K., Lee, Y.M., Pudjianto, D., Strbac, G. (2014). Role of losses in design of DC cable for solar PV applications, 2014 Australasian University Power Engineering Conference, AUPEC 2014 - Proceedings issue (October), 2–6.
- Ghenai, C., Ahmad, F.F., Rejeb, O., Hamid, A.K. (2021). Sensitivity analysis of design parameters and power gain correlations of bi-facial solar PV system using response surface methodology, *Sol Energy*, 223(April), 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.024>.
- Grygiel, P., Tarłowski, J., Przeźniak-Welenc, M., Łapiński, M., Łubiński, J., Mielewczyk-Gryn, A. et al. (2021). Prototype design and development of low-load-roof photovoltaic modules for applications in on-grid systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 233, 111384. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111384>
- Gostein, M., Littmann, B., Caron, J.R., Dunn, L. Comparing PV power plant soiling measurements extracted from PV module irradiance and power measurements, *Conference Comparing PV power plant soiling measurements extracted from PV module irradiance and power measurements*. 3004-3009. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2013.6745094>.
- IEA - International Energy Agency. (2018). *Energy Efficiency 2018: Analysis and Outlook to 2040*. in: Market Report Series, IEA/OECD, Ingarao, G.
- Jang, J., Lee, K. (2020). Practical performance analysis of a bifacial PV module and system, *Energies*, 13(17), 4389. <https://doi.org/10.3390/en13174389>.
- Jiang, H., Lu, L., Sun, K. (2011). Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic

- (PV) modules. *Atmos. Environ*, 45 (25), 4299–4304.
- Kaldellis, J.K., Fragos, P. (2011). Ash deposition impact on the energy performance of photovoltaic generators, *J. Clean. Prod*, 19 (4), 311–317.
- Kamalapur, G.D., Udaykumar, R.Y., (2011). Rural electrification in India and feasibility of Photovoltaic Solar Home Systems, *Int J Electr Power Energy Syst*, 33(3),594–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.12.014>.
- Kumar, N.M., Sudhakar, K., Samykano, M., Sukumaran, S. (2018). Dust cleaning robots (DCR) for BIPV and BAPV solar power plants-A conceptual framework and research challenges, *Procedia Compututer Science*, 133, 746–754.
- Liu, R., Liu, Z., Xiong, W., Zhang, L., Zhao, C., Yin, Y. (2024). Performance simulation and optimization of building façade photovoltaic systems under different urban building layouts, *Energy*, 288, 129708. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129708>
- Malamaki, K.D., Demoulias, C.S. (2014). Analytical Calculation of the Electrical Energy Losses on Fixed-Mounted PV Plants, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5-4, 1080-1089, doi:10.1109/TSTE.2014.2323694.
- Manikandan, S., Varun, M., Manikandan, S. (2020). Performance Evaluation of Bifacial and Monofacial modules in vertical and latitude mounting at South India using PVsyst, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 912(4). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/4/042066>.
- Moharram, K.A., Abd-Elhady, M.S., Kandil, H.A., El-Sherif, H. (2013). Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling, *Ain Shams Engineering Journal*, 4 (4), 869–877.
- Muneer, T., Asif, M. (2003). Generation and transmission prospects for solar electricity: UK and global markets, *Energy Convers Manag*, 44, 35–52.
- Oh, S., Figgis, B.W., Rashkeev, S. (2020). Effects of thermophoresis on dust accumulation on solar panels, *Sol. Energy*, 211, 412–417.
- Osmani, K., Ramadan, M., Lemenand, T., Castanier, B., Haddad, A. (2021). Optimization of PV array tilt angle for minimum levelized cost of energy, *Comput Electr Eng*, 96, 107474. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107474>.
- Öztürk, A., Dursun, M. (2011). 2,10 ve 20 KVA'lık Fotovoltaik Sistem Tasarımı, 6th Int. Adv. Techn. Symp.(LAST'11), 16-18 May 2011, Elazığ.
- Photovoltaic Effect. *Mrsolar.com*. Retrieved 12 December 2010. (<https://www.scribd.com/document/251085129/Photovoltaics>).
- Piedra, P.G., Llanza, LR, Moosmüller, H. (2018). Optical losses of photovoltaic modules due to mineral dust deposition: experimental measurements and theoretical modeling. *Sol Energy*, 164, 160–73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.030>.
- Qasem, H., Betts, T.R., Müllejans, H., AlBusairi, H., Gottschalg, R. (2014). Dust-induced shading on photovoltaic modules, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 22, 218–226.
- Restrepo-Cuestas B.J., Montano J. (2024). Bishop model parameter estimation in Photovoltaic cells using metaheuristic optimization techniques, *Solar Energy*, 270,112410. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112410>
- Ruan, T., Wang, F., Topel, M., Laumert, B., Wang, W. (2024). A new optimal PV installation angle

- model in high-latitude cold regions based on historical weather big data, *Applied Energy*, 359, 122690.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122690>
- Sanchez, A., Zhang, Q., Martín, M., Vega, P. (2022). Towards a new renewable power system using energy storage: an economic and social analysis, *Energy Convers Manag*, 252.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115056>.
- Senpinar, A. (2018). Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions, Chapter 2.16 Optimization Of Slope Angles
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00028-7>
- Sharma, S., Kurian, C.P., Paragond, L.S. (2018). Solar PV system design using PVsyst: a case study of an academic institute. In: *Proceedings of the 2018 international conference on control, power, communication and computing technologies, ICCPCCT 2018*, 123–8.
<https://doi.org/10.1109/ICCPCCT.2018.8574334>.
- Sreenath, S., Sudhakar, K., Yusop, A.F. (2021). Performance assessment of conceptual bifacial solar PV system in varying albedo conditions, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 1078(1), 012033.
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/1078/1/012033>.
- Stein, J.S., Riley, D., Lave, M., Hansen, C., Deline, C., Toor, F. (2018) . Outdoor field performance from bifacial photovoltaic modules and systems, In: *Proceedings of the 2017 IEEE 44th photovoltaic specialist conference (PVSC)*, 9, 3184.
<https://doi.org/10.1109/pvsc.2017.8366042>.
- Sulaiman, S.A., Singh, A.K., Mokhtar, M.M.M., Bourabee, M.A. (2014). Influence of dirt accumulation on performance of PV panels, *Energy Proc*, 50, 50–56.
- Tanesab, J., Parlevliet, D., Whale, J., Urmee, T. (2016). Dust Effect and its Economic Analysis on PV Modules Deployed in a Temperate Climate Zone, *Energy Procedia*, 100(September), 65–68.
- Vasilakopoulou, K., Ulpiani, G., Khan, A., Synnefa, A., Santamouris, M. (2023). Cool roofs boost the energy production of photovoltaics: Investigating the impact of roof albedo on the energy performance of monofacial and bifacial photovoltaic modules, *Solar Energy*, 265, 111948.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111948>
- Wald, L. (2021). *Fundamentals of Solar Radiation*. CRC Press, 270.
<https://doi.org/10.1201/9781003155454>
- Winter, C.-J., Sizmann, R. L., Vant-Hull, L. L. (Eds.) (1991). *Solar Power Plants*. Springer Berlin Heidelberg, 425. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61245-9>
- www.edirne.bel.tr, 2025
- Xu Z, Qu H, Li X, zhao Y, li Y, Han Z. (2020). Theoretical model of optical transmission and reflection characteristics of dusty PV modules. *Sol Energy Mater Sol Cell*, 213, 110554.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110554>.
- Yakubu, R.O., Mensah, L.D., D. Quansah, M.S. Adaramola, Hammed, Y. (2022). Performance evaluation of bifacial solar PV modules under different climatic regions in Nigeria, *E3S Web Conf*. 2022; 354:02006.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235402006>.
- Yao, W., Han, X., Huang, Y., Zheng, Z., Wang, Y., Wang, X. (2022). Analysis of the influencing factors of the dust on the surface of photovoltaic panels and its weakening law to solar radiation — a case study of Tianjin, *Energy*, 256, 124669.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124669>.

Yazdani, H., Yaghoubi, M. (2022). Dust deposition effect on photovoltaic modules performance and optimization of cleaning period: a combined experimental numerical study, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 51, 101946.

Zakharchenko, R., Licea-Jimenez, L., Perez-Garcia, S.A., Vorobiev, P., DehesaCarrasco, U., P´erez-Robles, J.F. (2004). Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/ thermal system, *Sol Energy Mater Sol Cell*, 82(1), 253–61. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.01.022>.

Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J., Yu, X. (2012). Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies, *Renewable Sustainable Energy Rev*, 16, 599–617. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.026>.

<https://www.isosenerji.com/gunes-enerjisi-sistemlerinde-jel-aku-secimi/>