

Fotovoltaik Panellerin Eğim Açısının ve Malzeme Çeşidinin Sistem Performansı Üzerine Etkisi

Hacer AKHAN^{1*}, Emir EMİRALİOĞLU¹, Enis EŞER¹, Ulaş Kıvanç SEÇGİN¹,
Kaan Berkay KARABIYIK¹ ve Kani Başar YENİCİ¹

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

Makale Künye Bilgisi: Akhan, H., Emiralioğlu, E., Eşer E., Seçgin, U.K., Karabıyık K.B. ve Yenici K.B. (2025). Fotovoltaik Panellerin Eğim Açısının ve Malzeme Çeşidinin Sistem Performansı Üzerine Etkisi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 26(1), 45-59.

Öne Çıkanlar

- Enlem açısı, PV panel optimum eğim açısını etkileyen parametrelerden biridir.
- Monokristal PV panelin enerji üretimi polikristal PV panele göre daha fazladır.
- Güneş ışınları PV panel yüzeyine dik açıyla geldiğinde performans maksimumdur.

Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihçesi: Geliş: 27 Mayıs 2025 Kabul: 23 Haziran 2025	Enerji yönetimi, enerjiyi tasarruflu kullanmanın yanında enerjiyi üretirken kayıpları en düşük oranda tutup mümkün olan en yüksek enerjiyi faydalı enerjiye dönüştürmeyi amaçlar. Bu doğrultuda enerji üretim sistemlerinin verimi etkileyen parametreler dikkate alınarak tasarlanıp işletilmesi, faydalı enerjinin artırılması açısından önem kazanır. Eğim açısı ve fotovoltaik panellerde kullanılan malzeme çeşidi, fotovoltaik sistem enerji üretimini ve verimini etkileyen parametrelerdir. Güneş ışınları PV panel yüzeyine dik açıyla geldiğinde performans maksimumdur. Bu nedenle, eğim açısının doğru ayarlanması, yıllık enerji üretiminin maksimuma ulaşabilmesi için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Edirne iklim koşulları için fotovoltaik panel eğim açısının, monokristal ve polikristal malzeme çeşitlerinin sistem performansı üzerine etkisi ayrıntılı ve kapsamlı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar yapılırken her bir PV panel eş zamanlı olarak aynı ortam ve işletme koşullarında çalıştırılmıştır. PV paneller 0°, 10°, 20°, 30° ve 40° eğim açılarındaki çalıştırılmıştır. Ayrıca her bir panel için RETScreen yazılımı kullanılarak nümerik analiz yapılmıştır. Edirne ili 2025 yılı mayıs ayı için en yüksek güç üretimi fotovoltaik panel eğim açısı 20° olduğunda sağlanmıştır. Monokristal PV panelin enerji üretimi polikristal PV panele göre daha fazladır.
Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik; Enerji verimliliği; Eğim açısı; Monokristal- polikristal malzeme.	

The Effect of Slope and Material Type of Photovoltaic Panels on System Performance

Article Info	Abstract
Article History: Received: May 27, 2025 Accepted: June 24, 2025	In addition to economical energy use, energy management aims to minimise losses during energy production and convert as much energy as possible into useful energy. In this respect, designing and operating energy generation systems that consider parameters affecting efficiency is important for increasing useful energy. The slope and the type of material used in photovoltaic panels affect the energy production and efficiency of the photovoltaic system. The PV panel's performance is at its maximum when the sun's rays are at right angles to its surface. Therefore, correctly adjusting the slope is crucial for maximising annual energy production. This study investigates in detail and comprehensively the effects of photovoltaic panel slope and material type (monocrystalline or polycrystalline) on system performance in Edirne climate conditions. During the experimental studies, each PV panel was operated under the same ambient and operating conditions simultaneously. The PV panels were operated at the slope of 0°, 10°, 20°, 30° and 40°. A numerical analysis was also performed on each panel using RETScreen software. The maximum power generation for May 2025 in Edirne province was attained when the photovoltaic panel slope was set at 20°. Monocrystalline PV panels produce more energy than polycrystalline PV panels.
Keywords: Photovoltaics; Energy efficiency; Slope; Monocrystalline- polycrystalline material.	

1. Giriş

Dünya nüfusunun artması beraberinde enerji sorununu da getirmektedir. Geleneksel enerji piyasası uzun yıllar boyunca petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlara bağımlı olmuştur. Bu yöntemler sera gazı emisyonlarına, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlara ve aynı zamanda, fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar, jeopolitik gerilimlere de neden olmaktadır. Artan enerji ihtiyacının fosil yakıtlardan karşılanması çevre kirliliğinin azaltılması ve sürdürülebilirliğin sağlanması için enerji üretim yöntemlerin de dünyanın değişime gitmesi gerekmektedir (International Energy Agency, 2018). Bu süreçteki arayış ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına alternatifler fosil yakıtlara göre daha çevreci ve sürdürülebilir olması nedeniyle günümüzde ilgi artırmıştır (tr.wikipedia.org, 2025). Yenilenebilir Enerji, sürekli devam eden doğal süreçlerdeki enerji akısından elde edilen enerjidir. Bir başka deyişle; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha hızlı bir şekilde kendini yenileyebilmesi olarak da tanımlanabilir. Bu kaynaklara güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermal enerji örnek verilebilir. Ülkemiz, güneş enerjisi bakımından yüksek potansiyele sahiptir (Şen, 2008). Yenilenebilir enerji kaynakları, yenilenemez enerji kaynaklarının tersine karbon salınımı yapmadan enerji üretme avantajına sahiptir. Böylece çevre dostudur, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar ve küresel sıcaklık artısını önlemeye yardımcı olur. Yenilenebilir enerji kaynakları, sadece çevresel sürdürülebilirliği desteklemekle kalmaz, aynı zamanda ekonomik kalkınmaya da büyük katkılar sağlar. Güneş, rüzgar, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal enerji gibi kaynaklar, enerji güvenliğini artırarak ithalata bağımlılığı azaltır, istihdam yaratır ve enerji maliyetlerini düşürerek uzun vadede ekonomik istikrarı desteklemektedir (International Energy Agency, 2018).

Yenilenebilir enerji yerel kaynaklara dayandığı için enerji arz güvenliğini artırır, ülkeleri dışa bağımlılıktan kurtararak ekonomik istikrar sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin maliyetleri geçmiş zamanlara göre hızla düşmekte ve gittikçe erişimi daha kolay bir hale gelmiştir (aydem.com.tr, 2025). Güneş panelleri ve rüzgar türbinleri gibi sistemler artık daha uygun fiyatlarla kurulabilmekte ve uzun vadede ekonomik tasarruf sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji sektörü, mühendislik, üretim, kurulum ve bakım gibi pek çok alanda istihdam olanakları sunmaktadır. Özellikle enerji depolama sistemleri ve akıllı şebekeler gibi gelişmeler, enerji sektörünün daha verimli hale gelmesini sağlamaktadır (International Energy Agency, 2018).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi, potansiyeli en yüksek enerji kaynaklarından biridir. Güneş enerjisinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına oranla maliyet azlığı, çevreye zararı olmaması, yakıt ihtiyacı bulunmaması, hızlı ve basit şekilde sistemlerinin kurulabilmesi gibi sebeplerden dolayı güneş enerjisinin kullanımını yoğunlaştırmıştır. Güneş enerjisi tükenmezliğin belirgin özelliğiyle büyük bir yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynağı olarak şu anda sürdürülebilir kalkınma için potansiyel çözümler sunmaktadır. Güneş enerjisi; potansiyeli, kullanım kolaylığı, yenilenebilirliği ve çevre dostu olmasından dolayı kolay biçimde yaygınlaşabilir (International Energy Agency, 2018).

Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır. PV sistemler, sürdürülebilir enerji üretiminin temel taşlarından biri haline gelmiştir (International Energy Agency, 2018).

Yıllar boyunca birçok araştırmacı, dünyanın farklı bölgelerinde optimum eğim açısını belirlemeye yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Literatürde PV panel eğim açısı üzerine yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır (piagrid.com). Qu ve diğerleri

çalışmalarında faz değiştiren malzemeler kullanılarak PV panellerinin soğutulmasının maksimum çıkış güçlerini, maksimum verimliliklerini ve dolum faktörlerini artırdığını göstermektedir. PV sisteminin eğim açısı 15° ila 60° aralığında çalışmışlardır. Yapılan çalışmada, eğim açısı arttıkça PV panel sıcaklığı azalmış ve faz değişim malzemesinin soğutma etkisi artmıştır (Qu vd., 2024). Bilgili ve Dağtekin'in 2016 yılında yaptığı çalışmada, fotovoltaik (PV) panellerin farklı eğim açılarında (15°-30°-45°-60°) ürettikleri enerji miktarı belirli periyotlarla gözlemlenmiş ve anlık, günlük, aylık ölçümlerle analiz edilmiştir. Araştırmada, farklı açılardaki panellerin aylık enerji üretim verileri karşılaştırılarak eğim açısının enerji verimliliği üzerindeki etkisi yüzde olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, paneller yıl boyunca 15° eğimle yerleştirildiğinde, yılın ilk ve son dört ayında diğer açılara göre yaklaşık %7-10 oranında enerji kaybı yaşanmıştır. Ancak, bu eğim açısına sahip paneller yılın ortasındaki dört aylık dönemde diğer açılara kıyasla daha verimli çalışmıştır (Bilgili ve Dağtekin, 2017). Arslan tez çalışmasında, güneş enerjisinden elektrik elde etmek için fotovoltaik (PV) panellerin eğim açılarının belirlenmesi amaçlanmıştır (Arslan, 2023). Geliş ve diğerleri yaptığı çalışmada yapay bir ışık kaynağı kullanılarak 120 W gücündeki bir fotovoltaik panelin performansı incelenmiştir. Fotovoltaik panel ile yapay ışık kaynağı arasındaki mesafenin (0.8 m, 1.4 m, 2 m) ve açının (0°, 20°, 40°) değişimi dikkate alınarak deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ışık kaynağı ile panel arasındaki mesafe arttıkça üretilen gücün azaldığını, ayrıca iki bileşen arasındaki açının büyümesiyle enerji üretiminde düşüş yaşandığını göstermektedir (Geliş ve Akyürek, 2020).

Khahro ve diğerleri, Pakistan'ın Sindh bölgesinde güneş enerjisi kaynaklarını değerlendirerek optimum eğim açısını belirlemiş ve yayılı güneş radyasyonunu tahmin etmiştir (Khahro, 2015). Navntoft, İspanya'daki Plataforma Solar de Almera'da yatay ve eğimli

yüzeylerde dört yıl boyunca yapılan güneş radyasyonu ölçümlerini analiz etmiştir. Yaz ve kış aylarında eğimli veya yatay ışının aylık ortalama oranlarının sırasıyla 0.95 ve 1.25 olduğu bulunmuştur (Navntoft, 2012). Chang, Tayvan'daki yedi farklı şehir için PV modüllerinin optimum eğim açısını tahmin etmek amacıyla, doğrusal olmayan zamanla değişen evrimsel parçacık sürü optimizasyon yöntemini kullanmıştır. Bu çalışma, modüllerden maksimum elektrik enerjisi elde etmeyi amaçlamaktadır (Chang, 2010). Mondol ve diğerleri, Kuzey İrlanda'daki mevsimsel ve günlük güneş radyasyonu değişkenliğini ve PV üretiminin konut elektrik faturalarındaki potansiyel tasarruflara etkisini incelemiştir. Gerçek zamanlı fiyat tarifeleri için yıllık bazda en yüksek tasarrufu sağlayan açının hafifçe batıya (190°) yönelmiş olduğu sonucuna varmışlardır (Mondol vd., 2008). Liu ve Jordan, tarafından gerçekleştirilen şebekeye bağlı bir PV sisteminin teknoloji-ekonomi optimizasyonuna yönelik çalışmada, elektrik tarifeleri kullanılarak panellerin en uygun eğim açısı hesaplanmıştır (Liu ve Jordan, 1960). Salari ve Javaran, sabit optimum eğim açısı kullanıldığında yatay yüzeye kıyasla %23'lük bir güneş ışıınımı artışı sağlandığını belirtmiştir. (Salari ve Javaran, 2017). Tian vd. yaptıkları çalışmada, fotovoltaik korumalı levhanın öncelikle süspansiyon bölgesinde hava konveksiyonuyla artan ısı dağılımı nedeniyle, geleneksel yalıtım levhalarına göre üstün azaltma etkileri sergilediğini göstermektedir. Çalışma alanında, fotovoltaik korumalı levha, ortalama olarak güneşli yamaç, sıcaklıklarını 3 °C'den fazla ve çözülme derinliğini, açıkta kalan alt zemine kıyasla 1 m'den fazla düşürmektedir. Fotovoltaik korumalı levhanın süspansiyon yüksekliği, bu bölgede güneşli-gölgeli yamaç, etkisini etkili bir şekilde azaltmak için 5,3 cm'den az olmamalıdır. Özetle, Permafrost alt zemin mühendisliğinde gölgeli-güneşli yamaç etkilerini azaltmak ve karbon salınımını azaltmak için bir referans sağlamaktadır (Tian vd., 2024). Shanmugan ve diğerleri, yaptıkları çalışmada güneş PV sistemlerinin

güneş, damıtma cihazlarıyla entegrasyonunu inceler ve güneş, PV sistemlerinde termal ve elektrik enerjisi kullanımını birbirinden ayırır. İnceleme, su kıtlığı ve sürdürülebilir enerji üretimi gibi kritik sorunların ele alınmasında güneş, fotovoltaik entegrasyonunun oynadığı önemli rolün altını çizerek, ülkenin büyümesine katkıda bulundu (Shanmugan, 2024). Nagengast ve diğerleri, belirli test yatağı yapılandırmasına dayanarak, PV panelleri altındaki yeşil veya siyah çatı seçiminin PV performansı üzerinde çok az etkisi oldu. Yeşil çatı-PV ile siyah çatı-PV montajları arasındaki güç, üretiminin büyüklüğündeki fark küçüktü (%0,5) ve Pittsburgh'da yıllık 9\$/60 panel kaybına ve Phoenix'te yıllık yaklaşık 8\$/60 panel faydasına denk gelmektedir. Sonuçlar ayrıca, sürekli olarak 25 °C'nin (77 °F) üzerindeki sahaların büyük olasılıkla yeşil çatı-PV kombinasyonundan küçük, olumlu bir etki göreceğini göstermektedir. Bina yöneticileri ve tasarımcılar bu sıcaklık ve güç, çıkışı etkileşimini çatı kararlarında küçük bir ekonomik faktör olarak değerlendirmelidir (Nagengast vd., 2013). Barbón vd., fotovoltaik sistemlerde modüllerin yerleşimi ve eğim açısının enerji üretimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Güney yönelimli ($\gamma = 0^\circ$) sistemlerde, optimum eğim açısına (β) göre sapmalar küçük olduğunda enerji kaybı sınırlı kalırken, β açısındaki artışla birlikte kayıpların arttığı belirlenmiştir. Yapılan analizlere göre, 21–23° sapmada %5, 31–33° sapmada %10, 37–40° sapmada %15 ve 43–47° sapmada %20 oranında enerji kaybı meydana gelmektedir (Barbón vd., 2022).

Bu çalışmada, Edirne iklim koşulları için polikristal ve monokristal silikon malzemenin ve farklı eğim açılarının PV sistem performansı üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Enerji Sahasında yapılan saha çalışmalarında ölçülen veriler kullanılarak, hangi panelin daha yüksek performansla çalıştığı tespit edilip, optimum eğim açısı belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar yapılırken her bir

PV panel eş zamanlı olarak aynı ortam ve işletme koşullarında çalıştırılmıştır. Ayrıca her bir PV panel RETScreen yazılımında simüle edilip analiz edilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular, Edirne ve benzer iklim özelliklerine sahip iklim bölgeleri için örnektir.

2. Teorik Bilgiler ve Deneysel Çalışmalar

2.1. Teorik Hesaplama Yöntemi

PV panellerin çıkış gücü hava koşullarından, güneş ışıınımından ve panel sıcaklığından oldukça etkilenir. PV panelin elektrik üretim değeri, PV üzerindeki güneş ışıınımına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak standart test koşullarında elde edilenden farklılık gösterir ve enerji girişi PV panel üzerindeki güneş ışıınımına bağlı olarak değişir. Çalışma gerilimi V_{PV} (volt) ve akımı I_{PV} (amper) olan PV panelin çıkış gücü P_{PV} (Watt), Eşitlik 1 ile ifade edilir. N_{PV} , PV panel sayısıdır (Kuczyński ve Chliszcz, 2023).

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV} \cdot N_{PV} \quad (1)$$

PV panel verimliliği (η_{PV}) Eşitlik 4 ile ifade edilir. PV panelin enerji verimliliği hesaplamaları için gerekli denklemler aşağıda verilmiştir. $\dot{E}_{giriş}$ PV panele enerji giriş değeri (Birim zamandaki enerji (gücü) (kW)), G ortalama güneş ışıınımı ve A_{PV} toplam panel yüzey alanına göre Eşitlik (2) ile hesaplanır (Kuczyński ve Chliszcz, 2023).

$$\dot{E}_{giriş} = A \times G \quad (2)$$

A PV panelin yüzey alanı [m^2], G güneş ışıınım değeri [W/m^2] olarak tanımlanır. Bu durumda, $\dot{E}_{çıkış}$ PV panelin net enerji çıkışı, Eşitlik (3) ile hesaplanır (Kuczyński ve Chliszcz, 2023).

$$\dot{E}_{çıkış} = P_{max} \quad (3)$$

$$P_{mak} = I_{SC} \times V_{OC} \times FF \quad (4)$$

FF (fill factor) dolum faktörüdür. Yani en yüksek çıkış gücünün, V_{OC} açık devre gerilimi ile I_{SC} kısa devre elektrik akımı çarpımına oranı doluluk faktörünü verir. Dolum faktörü genellikle bir fotovoltaik modülün elektrik üretim kalitesini belirtmek için kullanılır (Kuczynski ve Chluszcz, 2023).

$$FF = \frac{I_{mak} \times V_{mak}}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (5)$$

2.2. Nümerik Hesaplama Yöntemi

PV sistemi, RETScreen yazılımında simüle edilip analiz edilmiştir. RETScreen, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji projelerinin teknik ve ekonomik analizini gerçekleştirmek için geliştirilen kapsamlı ve ücretsiz bir yazılımdır. Kanada Doğal Kaynaklar Bakanlığı (Natural Resources Canada) tarafından geliştirilmiş olan bu program, dünya genelinde birçok akademik ve mühendislik projesinde kullanılmaktadır.

Özellikle fotovoltaik (PV) güneş enerjisi sistemleri için RETScreen; sistem tasarımı, enerji üretim tahmini, maliyet analizi, karbon salımı hesaplaması ve geri ödeme süresi gibi kritik değerlendirmeleri yapma imkânı sunmaktadır. Kullanıcılar panel tipi, panel verimi, eğim açısı, sistem kayıpları, inverter özellikleri gibi parametreleri girerek, yıllık üretim ve sistem performansını detaylı biçimde inceleyebilir.

RETScreen'in en büyük avantajlarından biri, içinde bulunan NASA'ya ait geniş iklim verisi tabanı sayesinde, sistemin kurulacağı bölgenin yıllık güneşlenme süresi, sıcaklık, rüzgâr hızı gibi çevresel etkenleri otomatik olarak hesaba katabilmesidir. Böylece yapılan analizler daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar vermektedir.

2.3. PV panel eğim açısının ve malzeme çeşidinin performansa etkisi

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. Çalışmalarda eğim açısı matematiksel ifadelerle temsil edilmektedir. PV panelin yıllık optimum eğim açısı $\propto$ yerel olarak Denklem 6 ile hesaplanır (Senpınar, 2018).

$$\text{Eğim Açısı } (\alpha) = 90^\circ - \beta N \quad (6)$$

βN güneş yükseklik açısı Denklem 7, deklinasyon açısı δ Denklem 8 ile ifade edilir (Senpınar, 2018). L kurulum yapılan sahanın enlem açısı, n 1 Ocak'tan itibaren gün sayısıdır.

$$\beta N = 90^\circ - L + \delta \quad (7)$$

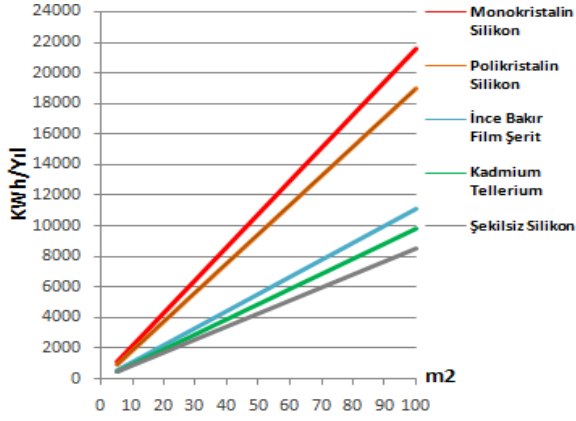
$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (8)$$

Çizelge 1'de kullanım sezonuna göre optimum eğim açısı hesaplama yöntemi yer almaktadır. Enleme ilave edilen veya enlemden çıkartılan sayısal değerlerin nedeni Zenit açısıdır. Zenit açısı, kış mevsiminde büyümekte, yaz mevsiminde ise küçülmektedir.

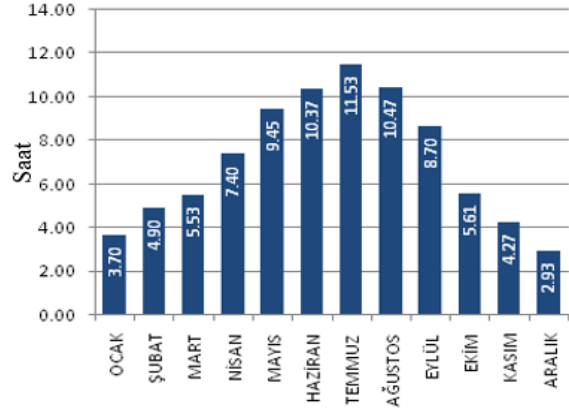
Çizelge 1. Kullanım sezonuna göre optimum eğim açısı

Kullanım sezonu	Optimum Eğim
Tüm yıl	$\alpha = \text{Enlem} \times 0,9$
7 aylık kış mevsimi	$\alpha = \text{Enlem} + 15^\circ$
Kış mevsiminde en soğuk üç ay	$\alpha = \text{Enlem} + 25^\circ$
Yaz mevsimi	$\alpha = \text{Enlem} - 25^\circ$

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.



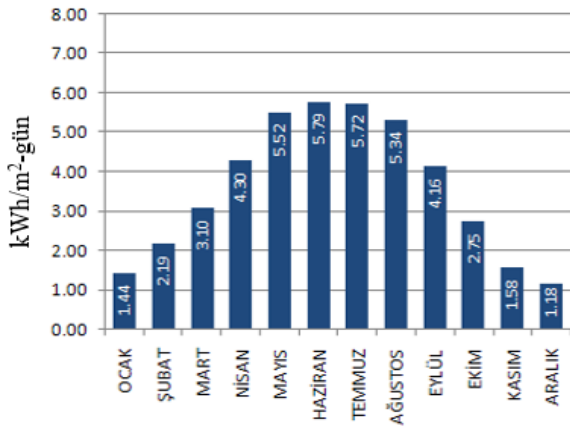
Şekil 1. Edirne/Merkez için PV tipi-alan-üretilebilecek enerji (<https://gepa.enerji.gov.tr/pages/22.aspx>,2025)



Şekil 3. Edirne/Merkez için Güneşlenme Süreleri (Saat) (<https://gepa.enerji.gov.tr/pages/22.aspx>,2025)

2.4.Kurulum yapılan lokasyonun özelliği

Edirne, 41°- 40° kuzey paraleli ve 26°- 34° doğu meridyeni arasında yer almaktadır. Edirne, 6.098 km² yüzölçümüyle deniz seviyesinden yaklaşık 41 metre yüksektir. Şehir bulunduğu konum itibarıyla hem Akdeniz iklimi hem de Orta Avrupa'ya özgü olan kara Şekil 2'de Edirne/Merkez için global radyasyon değerleri ve Şekil 3'te Edirne/Merkez için güneşlenme süreleri yer almaktadır.



Şekil 2. Edirne/Merkez için global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) (<https://gepa.enerji.gov.tr/pages/22.aspx>,2025)

2.5. Deney Düzenegi

Çizelge 2'de PV sistem elemanları ve özellikleri yer almaktadır. Sistemde 1 adet polikristal silikon ,2 adet monokristal silikon PV panel kullanılmıştır. Şekil 4'te PV sistem fotoğrafı ve Şekil 5'te PV sistem şematik gösterimi görülmektedir. Panellerin tek başına ürettiği enerjiyi belirleyebilmek için her bir PV panel ayrı ayrı MPPT şarj kontrol cihazına bağlanmıştır. MPPT şarj kontrol cihazı verileri uzaktan erişim ile kayıt altına alınmıştır.

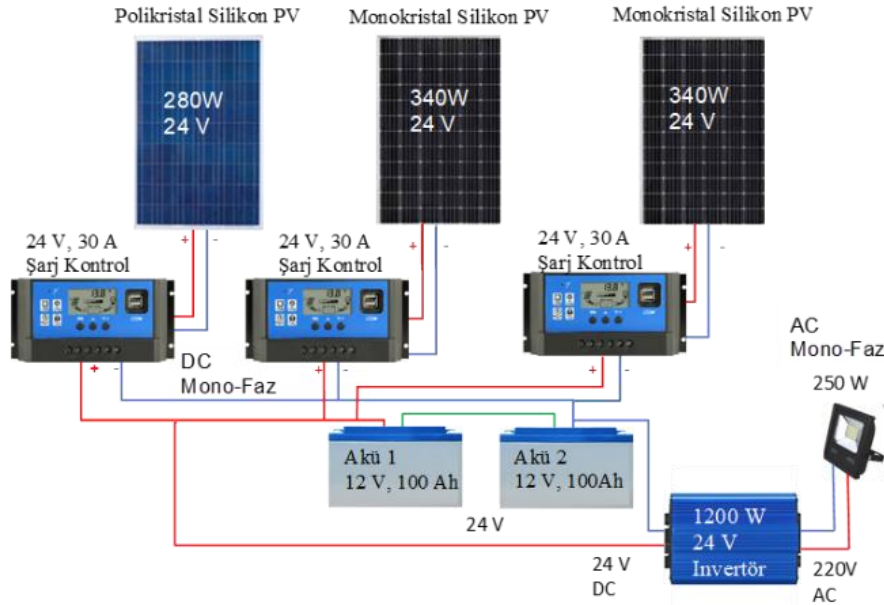
Elektrik PV panelde doğru akım (DC) olarak üretilir. İnverterde ise AC akıma dönüştürülür. PV panellerin etiket değerleri nominal özellikleri 1000 kW ve 25 °C standart test koşulları altında belirlenir. Çizelge 3'te PV panellerin teknik özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 2. PV sistem elemanları ve özellikleri

Sistem Elemanı	Özellik
Fotovoltaik sistem	
Polikristal PV panel	280 W, 24 V
Monokristal PV paneller	340W, 24 V
Solar şarj kontrol cihazı MPPT	30 A
Diğer ekipmanlar	
Akü	100 ah, 12 V
İnverter	1200 W, 24 V
AC led projektörler	250 W
Uzaktan veri ulaşım modülü	
Ölçme sistemi	
Eğim açısı ayarlanabilir taşıyıcı karkas yapı	



Şekil 4. PV sistem fotoğrafı



Şekil 5. PV sistem şematik gösterimi

Çizelge 3. PV panellerin teknik özellikleri

Özellik	Değer	
Hücre Tipi	Polikristal	Monokristal
Hücre dizilişi	60 (60x1)	60 (60x1)
Boyutlar	1640x990x35 mm	1660x1001x35 mm
Ağırlık	19 kg	19 kg
Ön kaplama	3,2 mm temperli cam	3,2 mm temperli cam
Çerçeve malzemesi	Alaşımlı alüminyum	Alaşımlı alüminyum
J-box	IP67	IP67
Kablo	4 mm ² (IEC)/12AWG(UL)	4mm ² (IEC)/12AWG(UL)
Nominal Max. Güç	280 W	340 W
Optimum Çalışma Gerilimi	31,2 V	34,98 V
Optimum Çalışma Akımı	8,97 A	9,72
Açık Çevrim Gerilimi (Voc)	37,8 V	42,56 V
Kısa Çevrim Akımı (Isc)	9,50 A	9,99 A
Modül verimi	%19	%23
Çalışma Sıcaklığı	-40°C~+85°C	-40°C~+85°C

3. Bulgular ve Tartışmalar

3.1. RETScreen Analizi

Bu çalışmada, güneş paneli türlerinin farklı eğim açılarına göre performans karşılaştırması yapılmıştır. Analiz kapsamında iki farklı panel tipi kullanılmıştır: Polikristal (Poli-Si) ve Monokristal (Mono-Si) paneller. Poli-Si panel 280 W güç ve %19 verim değerine sahipken, Mono-Si panel 340 W güç ve %24 verim değerine sahiptir.

Çizelge 4'te RETScreen analizi PV panel özellikleri yer almaktadır. Her iki panel için eğim açısı 0° ile 40° arasında artan şekilde değerlendirilmiştir. Bu veri seti, RETScreen programında kullanılarak farklı açıların enerji üretimi üzerindeki etkisi incelenmiş ve optimum eğim açıları belirlenmiştir.

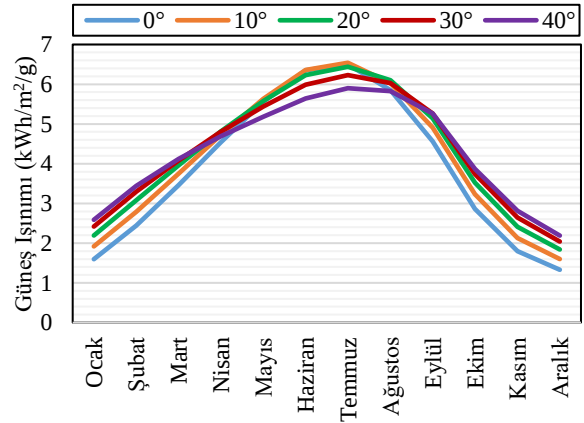
Çizelge 5 ve Şekil 6'da nümerik analizde kullanılan yatay ve eğimli düzleme gelen aylık ortalama güneş ışınımı RETScreen NASA verileri yer almaktadır.

Çizelge 4. RETScreen analizi PV panel özellikleri

Panel	Güç (W)	Verim (%)	Açı (°)
Poli-Si	280	19	0
			10
			20
			30
			40
Mono-Si	340	24	0
			10
			20
			30
			40

Çizelge 5. Yatay ve eğimli düzleme gelen aylık ortalama güneş ışınımı RETScreen NASA verileri

Ay	Güneş Işınımı (kWh/m ² /g)				
	0°	10°	20°	30°	40°
Ocak	1.6	1.92	2.19	2.42	2.59
Şubat	2.44	2.79	3.08	3.3	3.44
Mart	3.46	3.75	3.96	4.08	4.12
Nisan	4.54	4.72	4.81	4.8	4.69
Mayıs	5.56	5.63	5.58	5.44	5.18
Haziran	6.35	6.36	6.23	5.99	5.64
Temmuz	6.5	6.54	6.44	6.23	5.9
Ağustos	5.85	6.03	6.1	6.03	5.83
Eylül	4.56	4.91	5.14	5.26	5.26
Ekim	2.86	3.23	3.52	3.74	3.87
Kasım	1.8	2.13	2.41	2.64	2.81
Aralık	1.33	1.6	1.84	2.04	2.19
Yıllık Ortalama	3.91	4.14	4.28	4.34	4.3



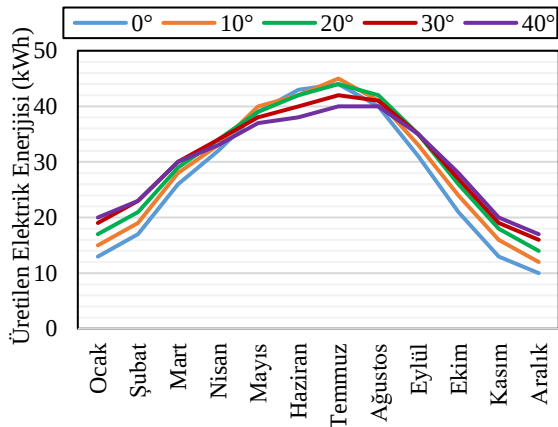
Şekil 6. Yatay ve eğimli düzleme gelen aylık ortalama güneş ışınımı RETScreen NASA verileri

Çizelge 6'da RETScreen analiz sonuçları görülmektedir. Her bir analiz için monokristal malzemeden üretilen PV panelin enerji üretimi polikristal silikon PV panele göre daha fazladır.

Çizelge 6. RETScreen analiz sonuçları

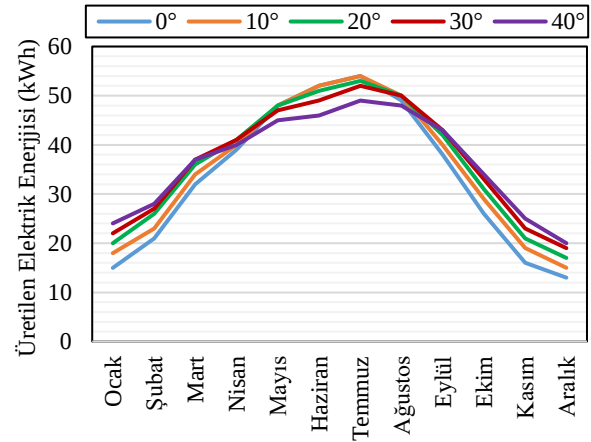
Ay	Şebekeye Verilen Elektrik(kWh) Polikristal Silikon Malzeme					Şebekeye Verilen Elektrik(kWh) Monokristal Silikon Malzeme				
	0°	10°	20°	30°	40°	0°	10°	20°	30°	40°
Ocak	13	15	17	19	20	15	18	20	22	24
Şubat	17	19	21	23	23	21	23	26	27	28
Mart	26	28	29	30	30	32	34	36	37	37
Nisan	32	33	34	34	33	39	40	41	41	40
Mayıs	39	40	39	38	37	48	48	48	47	45
Haziran	43	42	42	40	38	52	52	51	49	46
Temmuz	44	45	44	42	40	54	54	53	52	49
Ağustos	40	41	42	41	40	49	50	50	50	48
Eylül	31	33	35	35	35	38	40	42	43	43
Ekim	21	24	26	27	28	26	29	31	33	34
Kasım	13	16	18	19	20	16	19	21	23	25
Aralık	10	12	14	16	17	13	15	17	19	20
Yıllık toplam	330	348	359	364	361	401	423	437	442	439

Şekil 7’de polikristal silikon malzemeli ve Şekil 8’de monokristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücünün aylara göre değişimi yer almaktadır. Kış aylarında güneş ışınları eğik açı ile, yaz aylarında ise daha dik açı ile gelmektedir. Ayrıca PV panelden üretilen en yüksek güç, güneş ışınları panele 90° açı ile geldiğinde sağlanmaktadır. Dolayısıyla güneşin geliş açısının PV panel yüzeyine dik gelmesi için kış aylarında eğim açısının büyük, yaz aylarında ise eğim açısının küçük olması üretilen enerjiyi artırmaktadır.



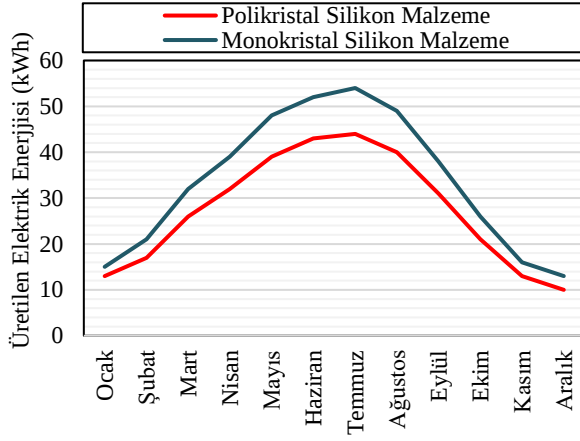
Şekil 7. RETScreen analizinde Polikristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücü

Analiz sonuçlarına göre kış ayları için 40° eğim açısında, yaz ayları için 20° eğim açısında daha yüksek güç üretimi sağlanmıştır.

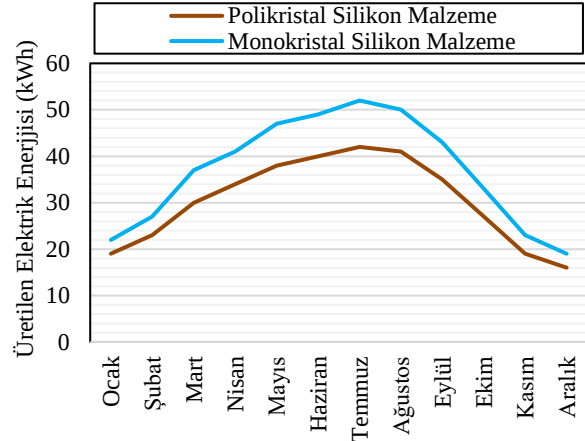


Şekil 8. RETScreen analizinde monokristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücü

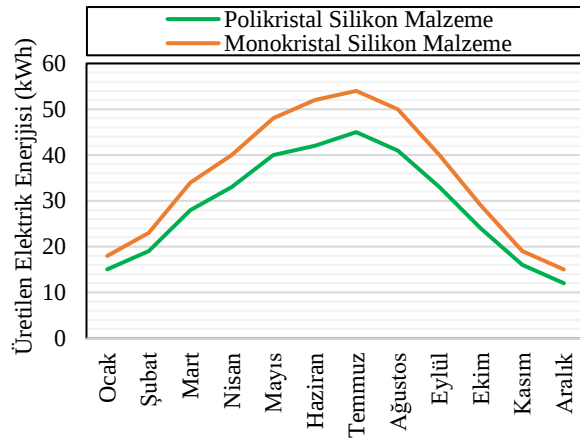
Şekil 9’da 0°, Şekil 10’da 10°, Şekil 11’de 20°, Şekil 12’de 30° ve Şekil 13’te 40° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması yer almaktadır.



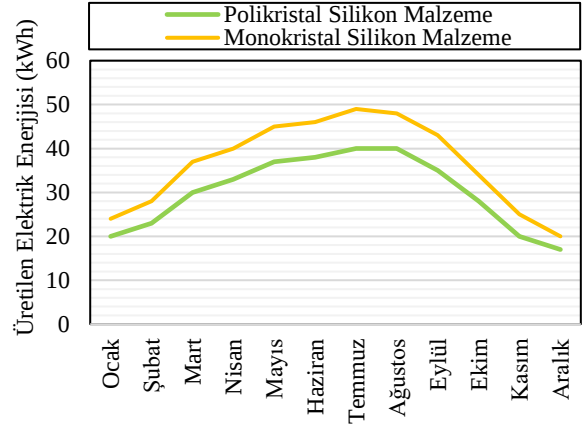
Şekil 9. RETScreen analizinde 0° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması



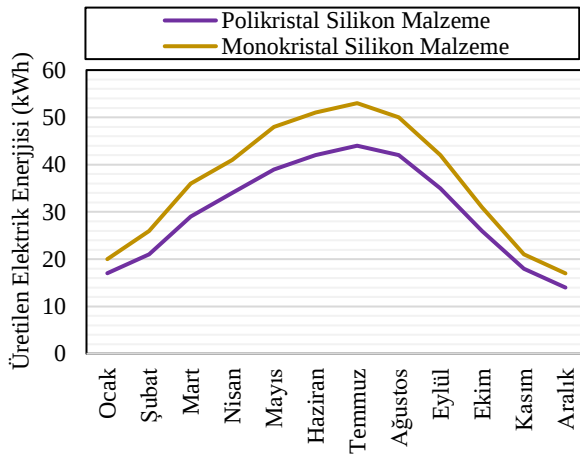
Şekil 12. RETScreen analizinde 30° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması



Şekil 10. RETScreen analizinde 10° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması



Şekil 13. RETScreen analizinde 40° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması



Şekil 11. RETScreen analizinde 20° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik enerjisi kıyaslaması

3.2. Deneysel Analiz

PV sistemlerde malzemenin enerji üretim performansına etkisi görebilmek için polikristal silikon malzemeli PV panelin eğim açısı ile monokristal silikon malzemeli panelin birinin eğim açısı aynı değere ayarlanmıştır. Aynı koşullar altında eğim açısının performansa etkisinin inceleyebilmek için ise diğer monokristal silikon PV panel farklı eğim açılarında çalıştırılmıştır. Şekil 14'te aynı eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV paneller ve Şekil 15'te farklı eğim açılı monokristal silikon malzemeli PV paneller görülmektedir.



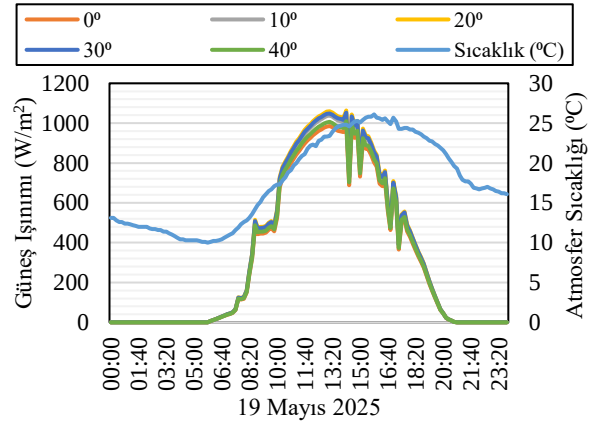
Şekil 14. Aynı eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV paneller



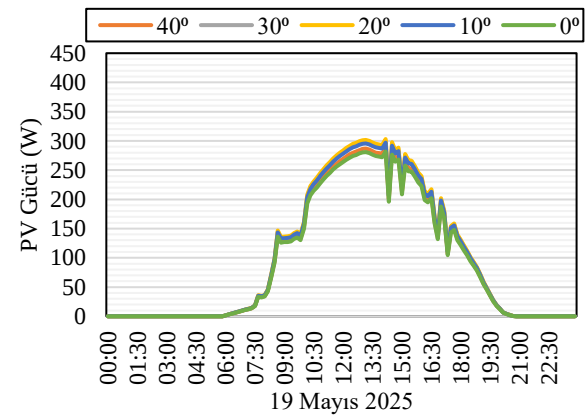
Şekil 15. Farklı eğim açılı monokristal silikon malzemeli PV paneller

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. Şekil 16'da 19 Mayıs 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışınlamı ve hava sıcaklığı değişimi verilmiştir. Şekil 17'de polikristal silikon malzemeli, Şekil 18'de monokristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik güç yer almaktadır. Diyagramlardan görüldüğü gibi monokristal PV panelin performansı daha yüksektir.

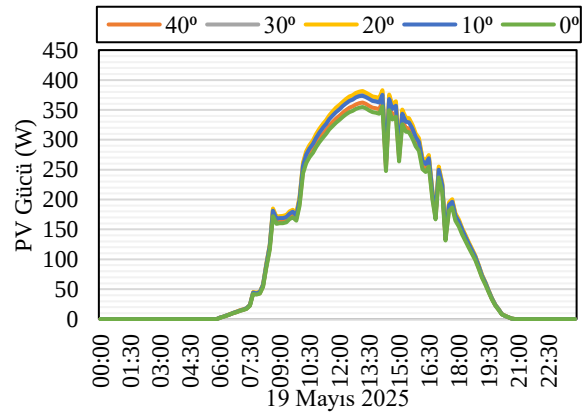
19 Mayıs 2025 için Şekil 19'da 0° eğim açılı, Şekil 20'de 10°, Şekil 21'de 20°, Şekil 22'de 30° ve Şekil 23'te 40° için PV panelin ürettiği elektrik güç değişimi görülmektedir. Diyagramlardan görüldüğü gibi ölçüm yapılan tarihte panelin optimum eğim açısı 20°'dir.



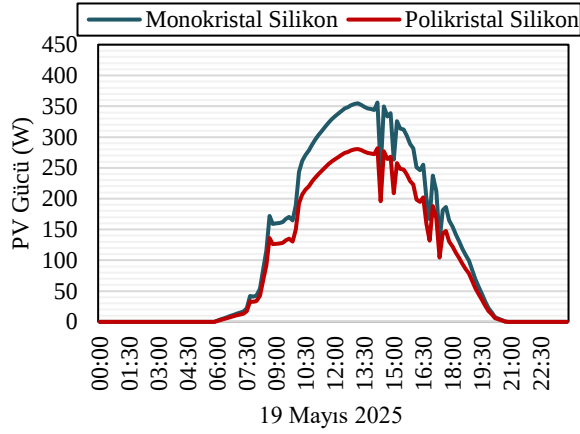
Şekil 16. 19 Mayıs 2025 için kurulum yapılan sahada ortalama güneş ışınlamı ve hava sıcaklığı değişimi.



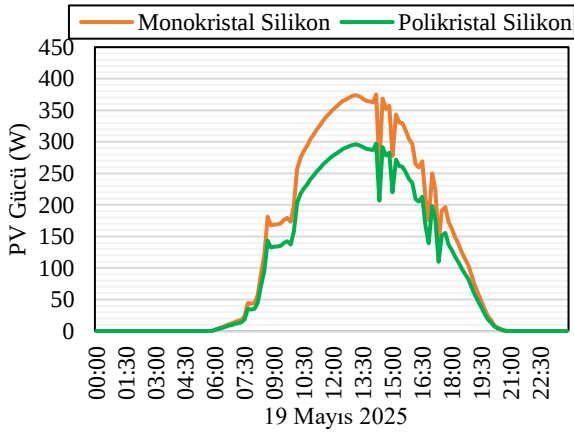
Şekil 17. 19 Mayıs 2025 için polikristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücü



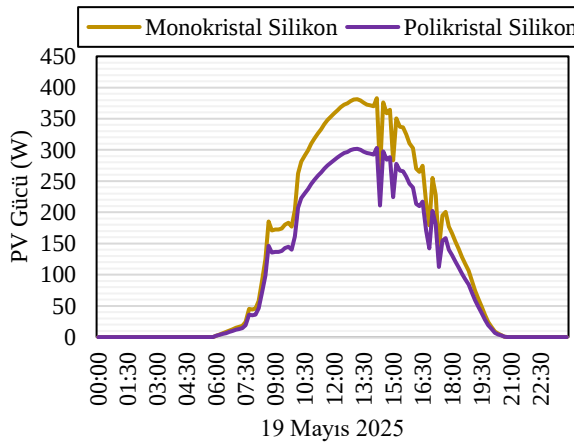
Şekil 18. 19 Mayıs 2025 için monokristal silikon malzemeli PV panelin farklı eğim açılarındaki ürettiği elektrik gücü



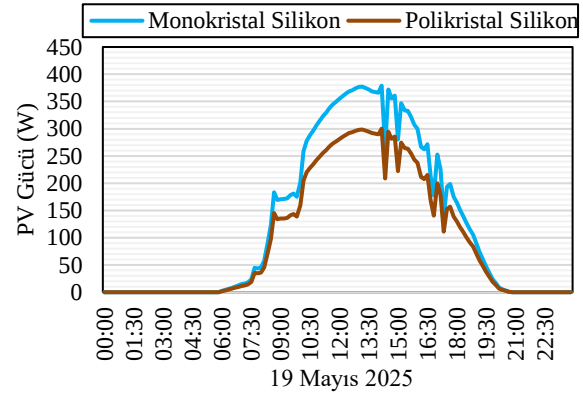
Şekil 19. 19 Mayıs 2025 için 0° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü



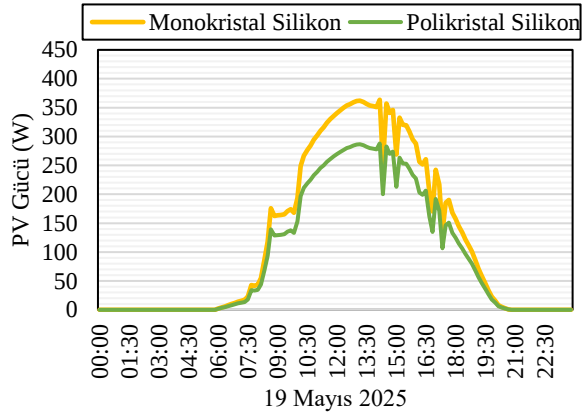
Şekil 20. 19 Mayıs 2025 için 10° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü



Şekil 21. 19 Mayıs 2025 için 20° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü



Şekil 22. 19 Mayıs 2025 için 30° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü



Şekil 23. 19 Mayıs 2025 için 40° eğim açılı polikristal ve monokristal silikon malzemeli PV panelin ürettiği elektrik gücü

4. Sonuçlar

PV sistemler Edirne gibi yıl boyunca uzun süre güneş ışığı alan bir şehir için en iyi alternatiftir. Bu çalışmada Edirne iklim koşulları için polikristal ve monokristal silikon malzemenin ve farklı eğim açılarının PV sistem performansı üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. RETScreen analiz sonuçlarına göre kış ayları için çalışılan eğim açıları değerlendirildiğinde 40° eğim açısında, yaz ayları için ortalama 20° eğim açısında daha yüksek güç üretimi sağlanmıştır. Yapılan deneysel analizlere göre ise Edirne iklim koşulları için 2025 yılı Mayıs ayında en yüksek güç üretimi PV panel eğim açısı 20° için elde edilmiştir. Monokristal malzemeden üretilen PV panelin enerji üretimi

polikristal silikon PV panele göre daha fazladır. Deneysel analiz ile nümerik analiz sonuçları uyumludur.

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.E., E.E., U.K.S., K.B.K., K.B.Y., Malzeme temini: TÜBAP, Veri toplama: H.A., Veri analizi/yorumlanması: H.A., E.E., E.E., U.K.S., K.B.K., K.B.Y., 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-2025/50).

ORCID

Hacer Akhan, 0000-0002-7896-6441

Emir Emiralioğlu, 0009-0008-4016-1673

Enis Eşer, 0009-0007-3526-4187

Ulaş Kıvanç Seçgin, 0009-0001-7249-6522

Kaan Berkay Karabıyık, 0009-0007-7848-5940

Kani Başar Yenici, 0009-0000-0999-3617

Kaynaklar

Arslan M. (2023). Fotovoltaik Sistemlerde Optimum Eğim ve Yönlendirme Açılarının Belirlenmesi, T.C Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,147.

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.

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>

Bilgili, M. E., Dağtekin, M. (2017). “Fotovoltaik Piller ile Elektrik Üretiminde Uygun Eğim Açısının ve Yıllık Oluşan Enerji Farkının Belirlenmesi”, Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi (GBAD), 156-167.

Chang, Y.P. (2010). Optimal the tilt angles for photovoltaic modules in Taiwan, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 32-9, 956-964.

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)

Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>

Geliş K., Akyürek E.F., Yoladı M., (2020). Panel Konumu ve Açısının Fotovoltaik Panel Karakteristiği Üzerine Etkisi, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(3), 1899-1908.

Grygiel, P., Tarłowski, J., Przeźniak-Welenc, M., Łapiński, M., Łubiński, J., Mielewczyk-Gryń, 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>
- IEA - International Energy Agency, (2018). *Energy Efficiency 2018: Analysis and Outlooks to 2040*. in: Market Report Series. IEA/OECD.
- Khahro, S.F. (2015). Evaluation of solar energy resources by establishing empirical models for diffuse solar radiation on tilted surface and analysis for optimum tilt angle for a prospective location in southern region of Sindh, Pakistan, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 1073-1080.
- Kuczynski, W., Chliszcz, K. (2023). Energy and exergy analysis of photovoltaic panels in northern Poland, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174, 113138.
- 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>
- Liu, Y.H.B., Jordan, C.R. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, 4- 3, 1-19.
- Mondol, D.J., Yohanis G.Y., Norton B. (2008). Solar, Solar radiation modelling for the simulation of photovoltaic systems, 33- 5, 1109-1120
- Nagengast A., Hendrickson C., Matthews H. S. (2013). Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice, *Energy and Buildings*,
- Navntoft, L.C. (2012). UV solar radiation on a tilted and horizontal plane: Analysis and comparison of 4 years of measurements, *Solar Energy*, 86-1, 307-318.
- Qu H., Du Z., Kong Q. (2024). Experimental study on the effect of tilt angle on the output parameters of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system under wind conditions, *Journal Of The Energy Storage*, 102, 114263. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114263>
- 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>
- Salari, M., Javaran, E. (2017). Optimising the tilt angle for solar surfaces using different solar irradiation models in Yazd, 323-331.
- Şen, Z. (2008). Solar energy in progress and future research trends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(4), 367-416
- Senpınar, 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>
- Shanmugan, S., Hammoodii, K. A., Eswarlal, T., Selvaraju, P., Bendoukha, S., Nabil Barhoumi, N., Mansour, M., Refaey, H.A., Rao, M.C., Mourad, A.H., Fujii, M., Elsheikhb, A. (2024). A technical appraisal of solar photovoltaic-integrated single slope single basin solar still for simultaneous energy and water generation, *Case Studies in Thermal Engineering*, 54, 104032 <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104032>

Tian R., Li X., Zhang Y., Zhang L., Yue Z., Li X., (2024). Mitigation of shady-sunny slopes effect on subgrade by photovoltaic sheltered boards in permafrost regions, Applied Thermal Engineering, 248,123087.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123087>

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>

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>

<https://gepa.enerji.gov.tr/pages/22.aspx>,2025, Mayıs 2025.

https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27de_g%C3%BCne%C5%9F_enerjisi, Mayıs 2025.

<https://www.aydemperakende.com.tr/blog/fotovoltaik-sistem-nedir>, Mayıs 2025.

<https://www.piagrid.com/rehber/gunes-paneli-acisi-ve-yonu>, Mayıs 2025