



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Farklı Tipteki Fotovoltaik Güneş Panellerinin Düzce için 2014-2019 Yılları Arası Yaz Ayları Performans ve Verimlilik Analizi

 Tuğba ÖZDEMİR<sup>a,\*</sup>,  Özge TÜZÜN ÖZMEN<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Temel Bilimler Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: tugbaozdemir238@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1060952

### Öz

Modern dünyanın vazgeçilmezi olan teknoloji, insanlığı enerjiye bağımlı hale getirmiştir. Kullanılan enerjinin sadece fosil yakıtlardan karşılanması insan sağlığına, ekonomiye ve çevreye hayli zarar vermektedir. Ulusları, yeni enerji kaynakları arayışına iten bu gibi olumsuzluklar yenilenebilir enerjiye olan ilgiyi ve yatırımı artırmıştır. Çevre dostu, bol, ucuz ve sağlıklı doğal enerji kaynakları başında güneş enerji gelmektedir. Ülkemize ve dünyamıza katkı sağlamak adına Düzce Üniversitesinde güneş enerjisinden faydalanmak üzere bir çalışma başlatılmıştır. Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT)'in çatısına toplam 7,5 kW kurulu güce sahip ve her biri 2,5 kW gücünde; amorf silisyum (a-Si), polikristal silisyum (p-Si) ve mono kristal silisyum (m-Si) fotovoltaik paneller Ekim 2013'de kurulmuştur. Bu çalışmada, söz konusu fotovoltaik panellerin verim, performans, ışınım ve günlük toplam üretilen enerji değerlerinin, 2014-2019 yılları yaz ayları (mayıs, haziran, temmuz, ağustos) baz alınarak 6 yıllık analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler ve hesaplamalar ışığında, panellerin yıllara göre performans ve verimleri Düzce şehri iklim koşullarında değerlendirilmiştir. Elde edilen analizler doğrultusunda, m-Si fotovoltaik paneli %12,8 verim ve % 87,6 performans ile en yüksek panel türü olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca tüm panellerin en etkili verim ve performans ile çalıştığı yıl olarak 2015 yılının yaz ayları olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Fotovoltaik paneller, Performans analizi, Verimlilik.

## Comparison of Different Types of Photovoltaic Solar Panels' Performance and Efficiency for Düzce from 2014 to 2019 Years Summertime

### ABSTRACT

Technology, which is indispensable in the modern world, has made human beings dependent on energy. Much of the world's global energy comes from fossil fuels which are harmful to people and the environment and also really expensive. Those negativities push the nations to investigate new energy sources and have in have increased the interest and investment in renewable energy. Solar energy is one of the most environmentally friendly, abundant, cheap and healthy natural energy sources. A study has been started in Düzce University to benefit from solar energy in order to contribute to our country and the world. Düzce University Scientific and Technological Research Application and Research Center (DUBIT) installed three photovoltaic panels of amorphous silicon (a-Si), polycrystalline silicon (pc-Si), and monocrystalline silicon (mc-Si). The three installed panels produce a total power of 7.5 kW such that 2.5 KW of power are produced by each panel independently. In this study, the efficiency, performance, radiation, and total daily energy values generated by the photovoltaic panels used, based

on the summer months (May, June, July, August) for the years 2014 to 2019, six-years analyses were completed. According to the analyses and calculations carried out, the performance and efficiency of the panels over the years were evaluated in the climatic conditions of Düzce. Analysis of the results obtained, it was concluded that the PV panel m-Si is the highest type of panel with an efficiency of 12.8% and performance of 87.6%. Furthermore, it was observed that the summer months of 2015 were the year in which all photovoltaic panels operated with the highest efficiency.

*Keywords: Photovoltaic systems, Performance analyzing, Efficiency.*

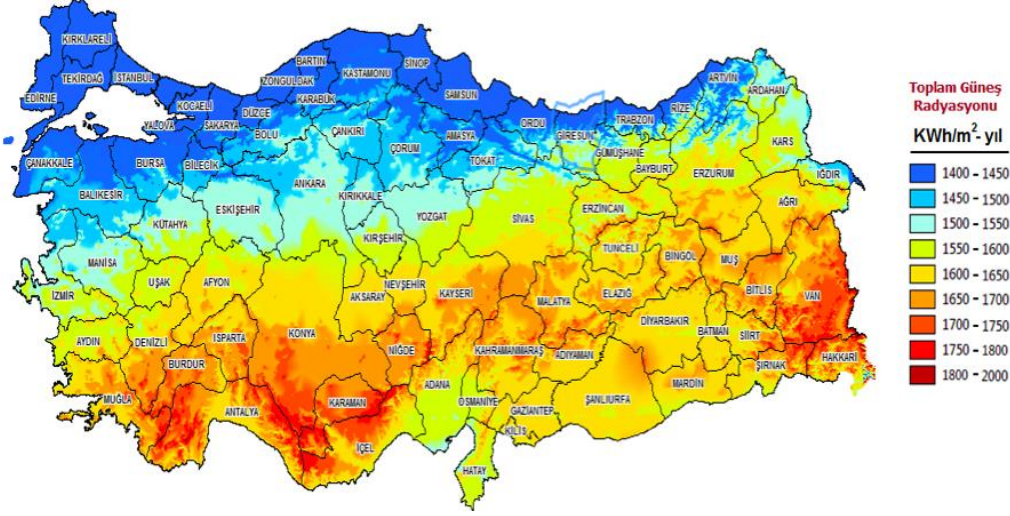
## **I. GİRİŞ**

21. yüzyılda teknolojinin hızla ilerlemesi enerji ihtiyacını önemli ölçüde arttırmıştır. Günlük hayatımızın vazgeçilmez parçası haline gelen akıllı telefonlar, bilgisayarlar ve her türlü elektronik aygıtlar ile birlikte makineler insanlığı enerjiye bağımlı hale getirmiştir. Bu durum tüm dünyada enerji ihtiyacının her geçen gün artmasına sebep olmaktadır.

Yüzyıllardır kullanılan ve klasik enerji kaynağı olarak bilinen fosil yakıtlarından (petrol, doğal gaz ve kömür vb. ) enerji üretimi; hem ekonomik açıdan hem de fosil yakıt rezervlerinin gün geçtikçe tükenmekte olması açısından avantajlı durumunu kaybetmesine sebep olmaktadır [1]. Bununla birlikte, fosil yakıtlar enerji elde etmek için yakıldığında çevreye karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), diazotoksit (N<sub>2</sub>O), ozon (O<sub>3</sub>) ve karbon monoksit (CO) gibi gazlar yaymaktadırlar [1], [2]. Sera gazı olarak adlandırılan bu gazlar, atmosferde güneş ışınlarından aldıkları ısıyı tutarak sera etkisiyle atmosfer sıcaklığının artmasına, bunun sonucunda da küresel ısınmaya neden olmaktadır [2]. Bu bağlamda, fosil yakıtların enerji talebini karşılamadaki rolü aynı şekilde devam ederse, endüstriyel CO<sub>2</sub> emisyonunun 2035 yılına kadar 35 GT seviyesine ulaşacağı ve bunun sonucunda atmosfer sıcaklığının 3,6 °C artacağı öngörülmektedir [2]. Küresel ısınma ve sürekli artan çevre kirliliği dünya genelinde ülke liderlerinin gündem konusu haline gelmiş olup dünya liderleri tarafından enerji konusunda yeni yol haritası çizmiş ve fosil yakıtların kullanımının 2040 yılına kadar azaltılması hedeflenmiştir [3]. Bu çalışmalar kapsamında küresel ısınma tehlikesine karşı, 196 ülkenin liderleri, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansında (United Nations Climate Change Conference (COP21)) bir araya gelip küresel ısınmayı 2°C'nin altında tutmak için 2012 yılında Paris Anlaşmasını imzalamışlardır [4]. Bu anlaşmanın temel amacı, ülkelerin enerji üretim ve tüketimleri sırasında, atmosfere salınan, iklim değişikliğine neden olan sera gazlarının kullanımını sınırlandırmaktır. Paris Antlaşması uygulanabilirse 21. yüzyılın ikinci yarısında küresel ısınmada düşüş beklenmektedir [4]. Tüm bu nedenlerden dolayı, enerji ihtiyacını karşılayabilmek için alternatif enerji kaynakları arayışı oldukça önem kazanmıştır. Bu kaynaklar arasında da çevre dostu, ekonomik ve yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneşten enerji üretimi ön plana çıkmaktadır. Çünkü güneş enerjisi çevreye herhangi bir zararı olmayan, temiz, ekonomik ve uzun ömürlü olması bakımından yenilenebilir enerji üretiminin başında gelmektedir [5], [6].

Fotovoltaik sistemler, güneş ışığından doğrudan elektrik enerji elde etmek için tasarlanan bir yarıiletken teknolojisidir [5], [6], [7]. Genellikle fotovoltaik sistemler, silisyum, germanyum, selenyum, bakır, arsenik, tellür gibi elementlerin saf ya da katkılı şekilde kullanılması sonucu elde edilir [5], [8]. Geçmişte fotovoltaik sistemlerin kurulumunda ve kullanımında yüksek üretim ve başlangıç maliyeti olmakla birlikte ülkemizin coğrafik konumu, fotovoltaik panellerinin hücre verimliliğinin artırılmasına yönelik son yıllarda yapılan çalışmalar ile fotovoltaik panellerin üretim ve kurulum maliyetlerini önemli ölçüde düşürülmesi fotovoltaik panellerin kullanımının oldukça avantajlı olmasını sağlamıştır [9], [10], [11]. Bu bağlamda, dünya devletlerinin yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına yönelmelerini Türkiye de yakından takip etmiş ve özellikle son yıllarda ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarına ciddi yatırımlar yapmıştır. Bu sayede ülkemizde kurulu bulunan güneş enerjisi santrallerinin (GES) sayısı ciddi anlamda artmıştır [10], [12].

Türkiye'nin coğrafik konumu itibariyle bir Akdeniz ülkesi olması güneşlenme süresi açısından oldukça avantajlı olmasını sağlamaktadır. Şekil 1'de Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası verilmiştir.



Şekil 1. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) [13].

Şekil 1'de görüldüğü gibi Türkiye güneş enerjisi konusunda şanslı bir coğrafik konuma sahiptir. Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saate (günlük yaklaşık 7,2 saat) tekabül etmektedir, yani ortalama toplam ışınım şiddeti de yaklaşık  $1.311 \text{ kWh/m}^2\text{yıl}$  (günlük  $3,6 \text{ kWh/m}^2$ ) değerindedir [13], [14]. Türkiye'nin güneş enerjisinden elektrik üretme potansiyeli yapılan tahminlere göre yıllık yaklaşık olarak  $380 \text{ TWh} - \text{yıl}$  şeklinde hesaplanmıştır. 2023 yılı için kurulu fotovoltaik sistem gücünün  $5.000 \text{ MW}$  olması yani hedeflenmektedir. Bununla birlikte, asıl hedef, 2023 yılı sonuna kadar Türkiye'nin toplam enerji ihtiyacının %30'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmektir [14]- [16].

Düzce ili  $40^\circ 50' 19.5''\text{N}$  kuzey,  $31^\circ 09' 45.1''\text{E}$  doğu boylamında yer almaktadır. Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nin Batı Karadeniz Bölümü'nde yer alan Düzce, toplam  $739,1 \text{ km}^2$  yüzölçümüne sahiptir. Düzce'nin doğusunda Zonguldak ve Bolu, güneyinde Bolu, batısında ise Sakarya şehirleri bulunmaktadır. Kuzeyinde Karadeniz'e kıyısı yaklaşık  $30 \text{ km}$  kıyısı vardır. Karadeniz'e kıyısı olması nedeniyle fazla sert olmayan ve nemli iklim etkisi altındadır [16], [17], [18].



Şekil 2. Düzce ili haritası.

Yıllık elektrik tüketimi  $837.616 \text{ MWh}$  olan Düzce, bu değer ile Türkiye'nin enerji tüketiminde %0,42'lik paya sahiptir [17], [18]. Düzce konumu gereği GEPA (Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası) raporuna göre Türkiye'nin güneş enerji üretiminde mavi (güneş enerjisine az uygun bölge)'de yer alır [12], [15], [18]. Buna rağmen yenilenebilir enerjide, Türkiye'deki mevcut kurulu gücün %0,08'ini sahip

ve bunun büyük bir kısmı hidroelektrik ve termik santrallerden karşılanmaktadır. Güneş enerjisinden faydalanması noktasında ise yıllık ortalama ışınım miktarı  $1400-1450 \text{ kWh/m}^2 - \text{yıl}$  ve rüzgar hızı yaklaşık  $1,5 \text{ m/s}$  olduğundan aslında yapılacak santralleri desteklemek için yeterli değildir [16], [17], [18]. Düzce, Türkiye'nin en az güneş ışığı alan bölgesinde bulunmasına rağmen güneş enerjisi özellikle su ısıtmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda ise fotovoltaik panellerden elektrik enerjisi üretmeye yönelik teşvikler ve çalışmalar yapılmaktadır [13], [17], [18].

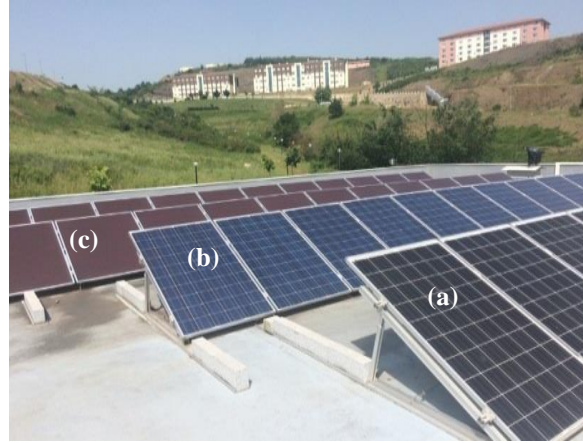
Bu makale çalışmasında, Düzce Üniversitesi DÜBİT çatısında 2013 yılından beri kurulu bulunan 3 farklı tipteki amorf silisyum (a-Si), polikristal silisyum (p-Si) ve mono kristal silisyum (m-Si) fotovoltaik panellerin performans ve verimlilik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler için, 2014 yılından 2019 yılına kadar olan 6 yıllık süre için panellerin güç değerleri, ışınım miktarı değerleri ve ortam sıcaklığı değerleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılmak üzere bu 6 yıllık verilerden yaz ayları verileri seçilmiştir. Özellikle yaz aylarının (mayıs, haziran, temmuz ve ağustos) seçilmesinin nedeni ise, Düzce şehrinin coğrafik konumu ve meteorolojik durumudur. Panellerin verim ve performanslarını, ışınım miktarının yüksek olduğu dönemde değerlendirmek amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada, 3 farklı tipteki fotovoltaik paneller için ışınım miktarı ile sıcaklık ve günlük üretilen ortalama enerji miktarının ayrıntılı analizleri hem panel türleri açısından hem de yıllara göre incelenmiştir.

## **II. MATERYAL VE METOT**

### **A. DÜZCE ÜNİVERSİTESİ MERKEZİ LABORATUVARI DÜBİT ÇATISINDA KURULU BULUNAN FOTOVOLTAİK PANELLER**

#### **A. 1. Fotovoltaik Panellerin Genel Özellikleri**

Düzce Üniversitesi DÜBİT'in çatısına toplam  $7,5 \text{ kW}$  kurulu gücündeki fotovoltaik paneller a-Si, p-Si ve m-Si Ekim 2013'de kurulmuştur. DÜBİT çatısında kurulu bulunan fotovoltaik paneller Şekil 3' de gösterilmektedir.



*Şekil 3. DÜBİT'in çatısında kurulu bulunan ve yaklaşık  $7,5 \text{ kW}$  kurulu güce sahip olan fotovoltaik paneller; a) m-Si, b) p-Si ve c) a-Si fotovoltaik panellerdir.*

Şekil 3'te görüldüğü gibi, DÜBİT çatısında, her biri  $235 \text{ W}$  gücünde 10 tane m-Si panel, her birinin gücü  $240 \text{ W}$  gücünde 11 tane p-Si panel ve her biri  $100 \text{ W}$  gücünde 24 tane a-Si panel bulunmaktadır. Panellerin elektriksel özellikleri detaylı olarak Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** DUBİT çatısındaki a-Si, p-Si, m-Si fotovoltaik panellerin standart test koşulları (SCT)'da elektriksel özellikleri.

<i>Parametreler</i>	<i>Mitsubishi MA100T2</i>	<i>Senfoni Enerjisi Se-M240</i>	<i>Senfoni Enerjisi SE-S235</i>
	<i>a-Si</i>	<i>p-Si</i>	<i>m-Si</i>
STC Güç Derecesi $P_{mp}$ (W)	100 W	240 W	235 W
Maksimum Güçte Voltaj $V_{mp}$ (V)	108 V	30,0 V	30,7 V
Maksimum Güçte Akım $I_{mp}$ (A)	0,93 A	8,01 A	7,65 A
Açık Devre Voltajı $V_{OC}$ (V)	141 V	36,6 V	37,3 V
Kısa Devre Akımı $I_{SC}$ (A)	1,17 A	8,71 A	8,22 A
$V_{OC}$ 'in Sıcaklık Katsayısı	-0,32 %/°C	-0,35 %/°C	-0,34 %/°C
$I_{SC}$ 'in Sıcaklık Katsayısı	0,14 %/°C	0,06 %/°C	0,03 %/°C
Panel Verimliliği ( $\eta$ ) (%)	6,2 %	14,9 %	14,6 %

Tablo 1'de elektriksel özellikleri verilen farklı tip fotovoltaik panellerden elde edilen veriler (güç, ışınım, ortam sıcaklığı ve panel sıcaklığı) Ekim 2013'den beri Sunny webbox cihazı aracılığıyla 5'er dakikalık periyotlarla kaydedilmektedir. Sunny webbox cihazı merkezi bir iletişim ara yüzüne sahiptir. Fotovoltaik panellere bağlı olan bu cihaz, bilgisayarlara kablo ile bağlanabilir ve verileri toplar, belgeler ayrıca fotovoltaik sistemlerin sürekli ve düzenli olarak izlenmesini sağlar. Sunny webbox cihazının veri depolama kapasitesi 2 GB'tır ve -25°C ile +50 °C arasındaki sıcaklıklarda çalışabilmektedir.

Şekil 4'te gösterilen ve üç farklı tip fotovoltaik panellerin her birine seri bağlı olan Sunnyboy 2500 HF-30 invertörleri ve Sunny webbox kontrol cihazının fotoğrafı sunulmaktadır.



**Şekil 4.** DUBİT çatısındaki fotovoltaik paneller için kullanılan 3 invertör ve kontrol cihazı.

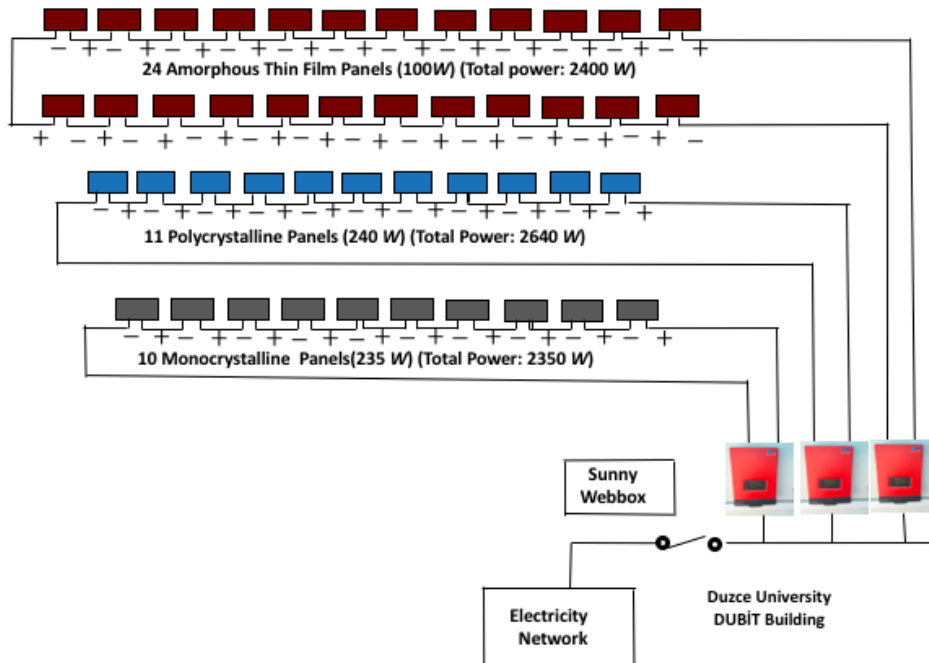
Bilindiği üzere, fotovoltaik panellerden üretilen DC akımı alternatif akıma (AC) çevirip, akım ve gerilimin bilgilerinin anlık, günlük ve toplam olarak gözlemlenmesi ve izlenmesi invertörler aracılığıyla gerçekleşmektedir. Şekil 4'te de görüldüğü gibi bu çalışmada 3 adet Sunnyboy 2500 HF-30 tek fazlı invertör kullanılmıştır ve her pano tipinin çıkışına bir invertör yerleştirilmiştir. Kullanılan invertörler 2600 W doğru akımı (DC) güç invertörleridir ve elde edilen verim %96,3 olmuştur. İnvörtörlerin her birinin boyutu 348x580x145 mm ve ağırlığı yaklaşık 17 kg'dır. Kullanılan invertörlerin teknik özellikleri ise Tablo 2'de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Sunnyboy 2500 HF-30 invertörlerin teknik özellikleri.

<i>Parametre (Giriş DC)</i>	<i>SunnyBoy 2500HF-30</i>
Maks. DC Güç (@ $\cos \varphi=1$ )	2600 W
Maks. Giriş Voltaj	700 V
MPP voltaj aralığı/nominal giriş voltajı	175V-560V/530V
Min. (Giriş voltajı / ilk giriş voltajı)	175V/220V
Maks. Giriş Akım	15 A

Maks. Dizi başına giriş akımı	15 A
Bağımsız MPP girişleri / MPP girişi başına diziler	1/2
<b>Parametre (Çıkış AC)</b>	
Nominal çıkış gücü (@ 230V, 50 Hz)	2500 W
Maks. Görünen AC Gücü	2500 VA
Nominal AC voltajı / aralığı	220,230,240V/180-280V
AC güç frekansı / aralığı	50, 60 Hz/-4.5...+4.5 Hz
Nominal güç frekansı/Nominal güç voltajı	50 Hz/ 230V
Maks. çıkış akımı	14,2 A
Nominal güçte güç faktörü	1
Besleme aşamaları / bağlantı aşamaları	1/1
<b>Maks. Verimlilik / Avrupa verimliliği</b>	<b>96,3%/95,3%</b>

Tablo 2’de teknik özellikleri verilen invertörler ve paneller, Düzce Üniversitesi bünyesindeki merkezi laboratuvar olarak kullanılan DÜBİT binasının çatısında Şekil 5’teki şemada olduğu gibi bağlanmıştır.



Şekil 5. DÜBİT çatısında kurulu olan fotovoltaik güneş panellerinin şematik gösterimi.

Şekil 5’teki verilen şemada görüldüğü gibi, m-Si ve p-Si panelleri invertöre seri bağlanarak tek sıra halinde yerleştirilmiştir. Çift sıra halinde kurulu olan a-Si paneller de invertöre seri olarak bağlanmıştır. Ayrıca panellerin yüzey sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve metrekare başına düşen ışınım miktarı TFA 35.1077 meteorolojik istasyon cihazı ile ölçülmektedir.

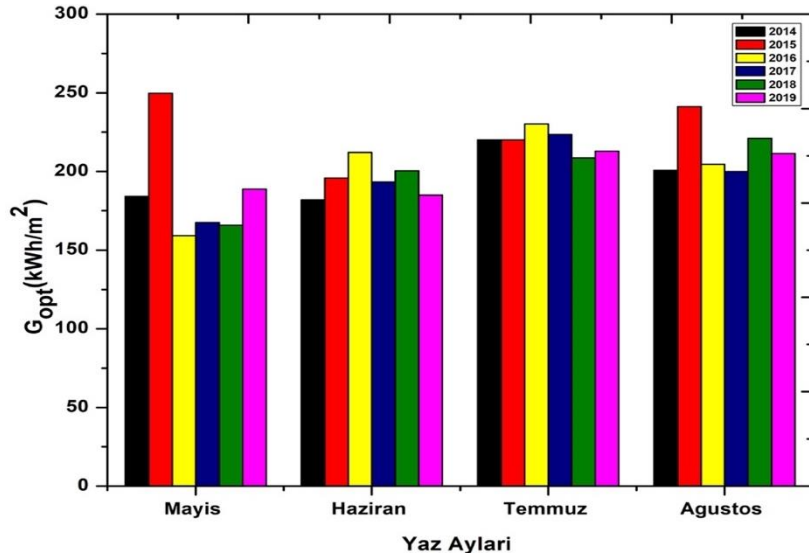
## B. FOTOVOLTAİK PANELLERİN YAZ AYLARI VERİ ANALİZİ

### B.1. Işınım ve Sıcaklık

Işınım, saniyede bir metrekarelik alana çarpan ışık enerjisinin miktarıdır. Bu enerjiyi taşıyan fotonlar x-ışınlarına, gama ışınları, görünür ışık, kızılötesi, radyo dalgalarına kadar dalga boylarına sahiptir [19], [20], [25]. Yaptığımız çalışmada verim ve performans değerleri hesaplarken toplam ışınımın normalize hali ( $I_R$ ) kullanılır [21], [22], [25].

$$I_T = I_R \cdot \text{Yüzey Alan} \quad (1)$$

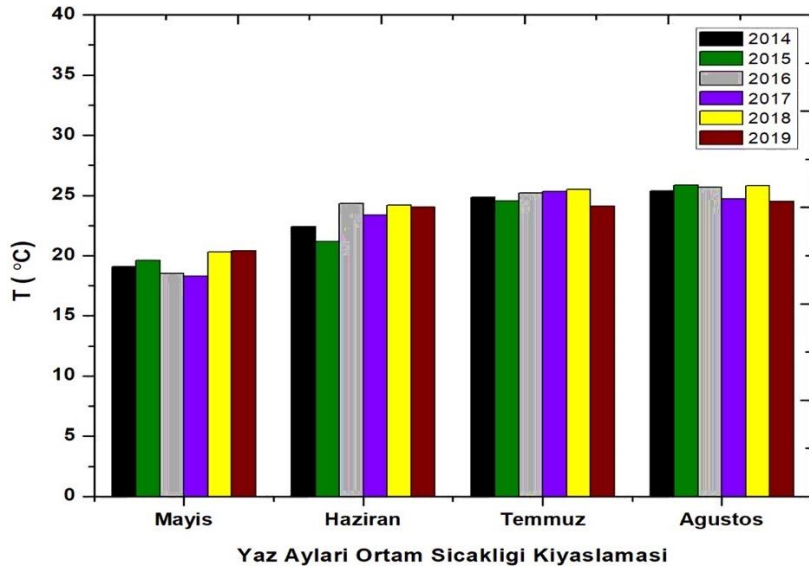
$I_R$ , toplam ışınımın normalize halidir,  $I_T$ , yüzeye düşen toplam ışınım miktarıdır [21], [22], [25]. Düzce ilinin 2014-2019 yılları yaz ayları için günlük ortalama toplam ışınım miktarı Eş.(1) kullanılarak hesaplanmıştır. Fotovoltaik panellerinin verim ve performansını doğrudan etkileyen ışınım miktarının Düzce için 6 yıllık ortalaması  $199,18 \text{ kWh/m}^2$  olarak bulunmuştur. Fotovoltaik panellerin çıkış gücü ışınım miktarına ve ortam sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Bu yüzden Şekil 6'da ışınım miktarı yıllara göre kıyaslanmıştır.



Şekil 6. Günlük ortalama toplam ışınım miktarının yıllık kıyaslaması.

Şekil 6 incelendiğinde 2015 yılı mayıs ayı günlük ortalama toplam ışınım miktarının diğer yıllardan daha fazla olduğu görülmektedir. 2015 yılı ışınım miktarı yaz ayları için toplam ortalama değeri  $202,16 \text{ kWh/m}^2$  karşılık gelmektedir. Toplam ışınım miktarının en düşük olduğu yıl ise  $196,16 \text{ kWh/m}^2$  değeri ile 2017 yılı olmuştur.

Şekil 7'de , Düzce için ortam sıcaklığının yaz ayları ortalamaları hesaplanarak yıllara göre kıyaslaması çizilmiştir.

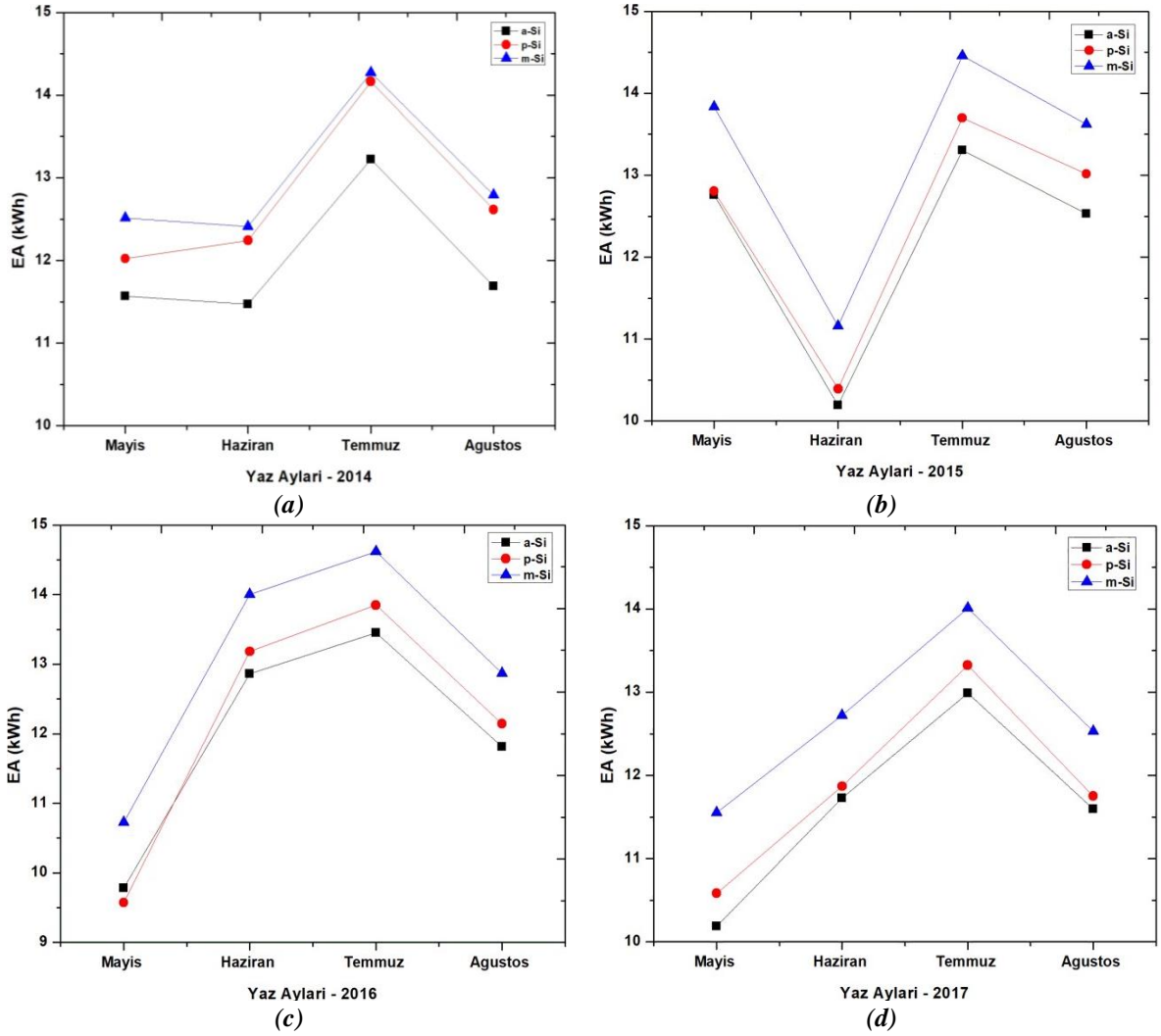


Şekil 7. 2014-2019 yılları yaz ayları ortam sıcaklığı kıyaslaması.

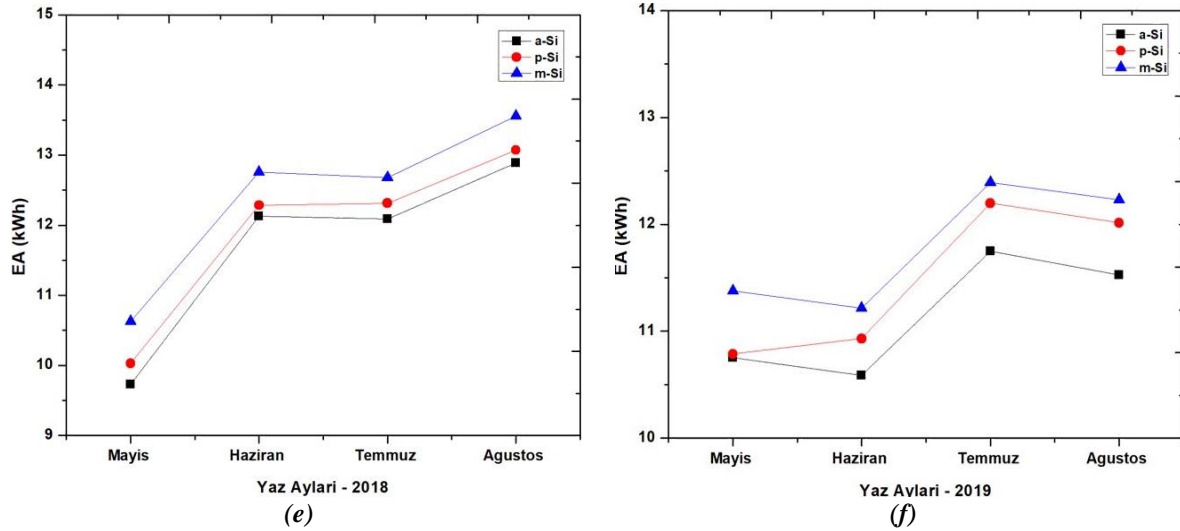
Şekil 7’de görüldüğü üzere TFA 35.1077 cihazı ile ölçülen ortam sıcaklığı, 6 yıl için de 22,93°C ile 23,94°C arasında değişmektedir. Yaz ayları ortam sıcaklığının en yüksek olduğu yıl ise 23,5°C ile 2018 yılıdır.

## B.2. Panellerden Üretilen Yıllık ve Günlük Ortalama Enerji Miktarı

DÜBİT çatısında bulunan fotovoltaik panellerin; üretilen ortalama enerji değerleri, ışınım miktarı, ortam sıcaklığı, panel sıcaklığı gibi çoğu değerleri her 5 dakikada bir data-logger tarafından kaydedilmektedir. Kaydedilen bu değerlerden günlük üretilen ortalama enerji miktarının yıllara, aylara ve panel tipine göre kıyaslamaları Şekil 8’da gösterilmiştir.







**Şekil 8.** Günlük üretilen ortalama enerji miktarının kWh değeri olarak yıllık gösterimi. Fotovoltaik panellerin yıllık yaz ayları ortalamaları; (a) 2014, (b) 2015, (c) 2016, (d) 2017, (e) 2018 ve (f) 2019.

Şekil 8 (a), (b), (c), (d), (e) ve (f)'de DÜBİT çatısında bulunan 3 farklı tipteki fotovoltaik panellerinin üretilen günlük ortalama enerji miktarı yaz ayları baz alınarak hesaplanmıştır. 2014 yılı ile 2019 yılı dahil olmak üzere her yıl için ayrı ayrı panellerin ürettiği enerji yaz ayları ortalaması gösterilmiştir. Analizi yapılan fotovoltaik panellerin ürettiği enerji miktarına bakıldığında, panellerin enerjisinin en yüksek olduğu yıl 2015 yılı olduğu görülmüştür. Panellerden a-Si fotovoltaik panelinin 2014-2019 yılları arası mayıs-agustos ayları arasında ürettiği ortalama enerji 12,19 kW, p-Si panelinin 12,47 kW ve m-Si panelinin ürettiği yıllık ortalama enerji ise 13,26 kW olarak ölçülmüştür.

### B. 3. Verim ve Performans

Fotovoltaik panellerin verimliliği, standart test koşulları (1000 W/m<sup>2</sup>) altında, yani fotovoltaik panele ışınım uygulandığında, 1m<sup>2</sup>'lik alanda panelin ürettiği güç ile belirtilmektedir [23], [24]. Böylece, panellerin verimliliklerinin ve ışınım miktarlarının karşılaştırılarak yapılan literatür çalışmaları; fotovoltaik panellerin çalışma prensipleri, kurulumu için uygun bölgeler ve panellerin ekonomik getirisi için oldukça önem arz etmektedir [24], [26], [27].

Bu bağlamda, çalışmanın bu kısmında, DÜBİT çatısında kurulu bulunan 3 farklı tipteki fotovoltaik panellerin, 2014-2019 yılları yaz aylarındaki verim ve performansları incelenmiştir. Bu bağlamda, her bir tip fotovoltaik panele ait olan ve panellerin verim ve performans hesaplamalarında kullanılan toplam kurulu güç ve yüzey alanı bilgileri Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** DUBİT çatısındaki a-Si, p-Si, m-Si fotovoltaik panellerinin özellikleri.

Fotovoltaik Paneller	Toplam Kurulu Güç Değerleri ( kW )	Toplam Kurulu Yüzey Alanları ( m <sup>2</sup> )
a-Si	2,4	37,8
p-Si	2,4	17,06
m-Si	2,35	16,06

DÜBİT çatısındaki fotovoltaik panellerinin referans verimlilikleri her bir panel için; özelliklerinden Tablo 3'ten faydalanılarak hesaplanır. Fotovoltaik panellerin referans verimleri Eş. (3), Eş. (4) ve Eş. (5)'te verilmiştir. Eşitliklerdeki ifade eder.

$$Y_{fa} = \frac{kW}{2,4} \quad (\text{a-Si}) \quad (3)$$

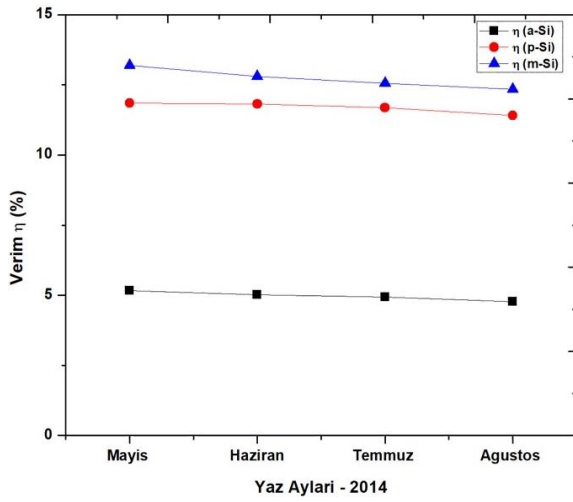
$$Y_{fp} = \frac{kW}{2,4} \quad (\text{p-Si}) \quad (4)$$

$$Y_{fm} = \frac{kW}{2,35} \quad (\text{m-Si}) \quad (5)$$

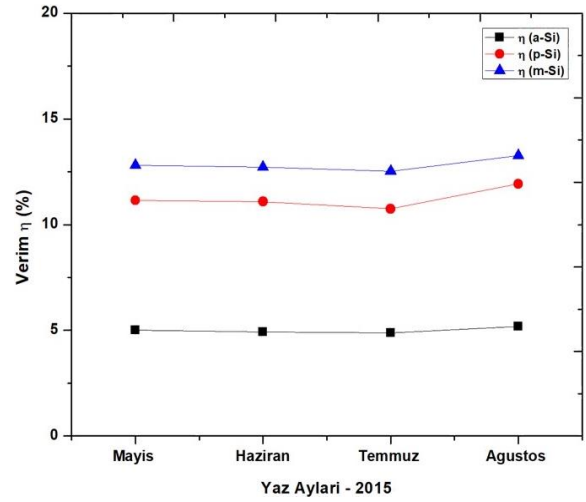
Verimi hesaplarken;

$$N_T = \frac{\text{Üretilen Enerji (kWh)}}{I_R \times \text{Yüzey Alanı}} \quad (6)$$

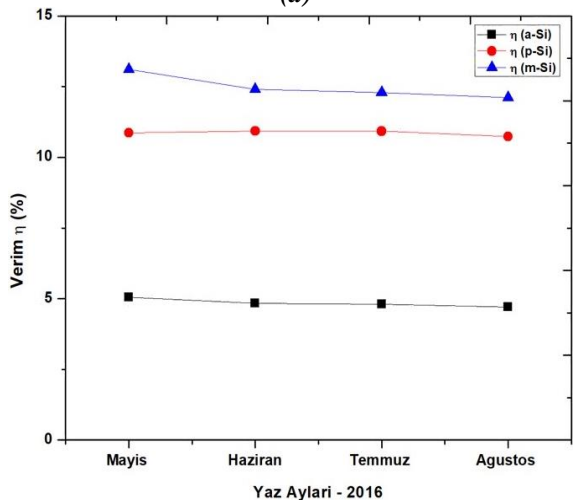
Burada;  $Y_f$  değeri, “referans verim”,  $N_T$  değeri “verim”,  $I_R$  ise “toplam ışınımın normalize hali” olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, yukarıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilen veriler öncelikle günlük ortalamaları, daha sonra aylık ortalamaları alınıp fotovoltaik panellerin verim ve performans analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan 3 farklı tip güneş panellinin mayıs, haziran, temmuz ve ağustos ayları için verimleri 2014-2019 yılları arası için kıyaslamalı olarak Şekil 10’da verilmiştir.



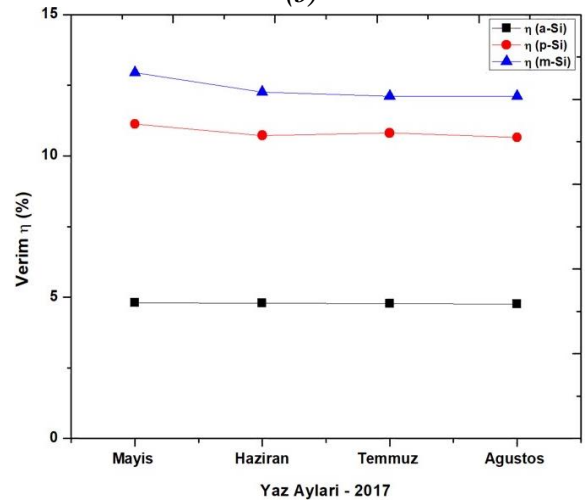
(a)



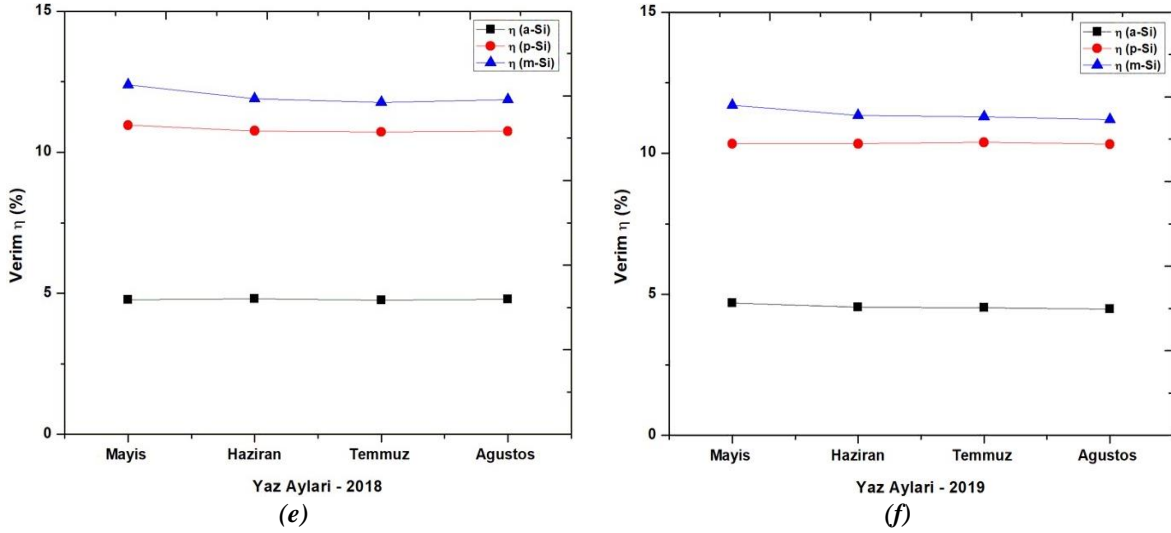
(b)



(c)



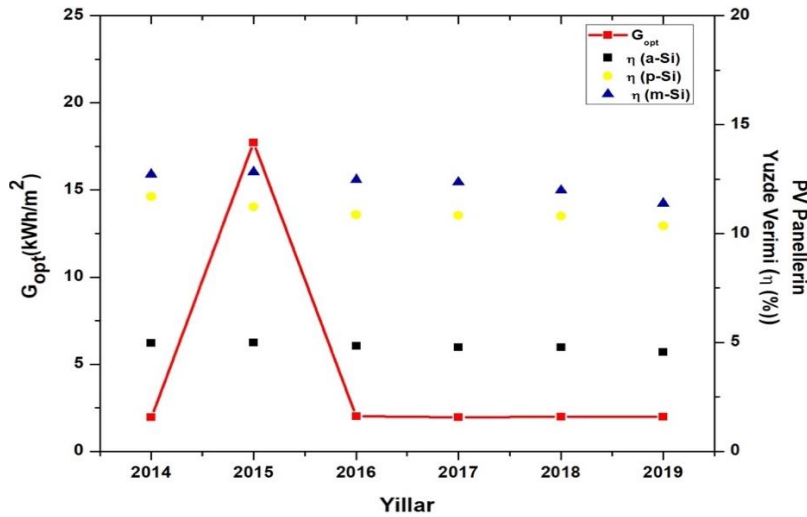
(d)



**Şekil 9.** Fotovoltaik panellerin yaz ayları yüzde verimlerinin yıllara göre; (a) 2014, (b) 2015, (c) 2016, (d) 2017, (e) 2018 ve (f) 2019 gösterimi.

Şekil 9’da görüldüğü üzere her bir tip panelin yüzde verimleri 2014-2019 arasındaki 6 yıl için birbirine oldukça yakın değerler göstermektedir. Bununla birlikte, literatürde yapılan [20]-[23], [26]-[32] çalışmalar ile benzer olarak, DÜBİT’in çatısında kurulu bulunan her biri 2,5 kW kurulu güce sahip m-Si, p-Si ve a-Si fotovoltaik panellerin arasında en yüksek verimliliğe sahip güneş paneli, ölçüm yapılan aylardan ve yıllardan bağımsız olarak m-Si fotovoltaik panel olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla yapılan bu çalışmada panelleri (m-Si, p-Si ve a-Si) her birinin verimlerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

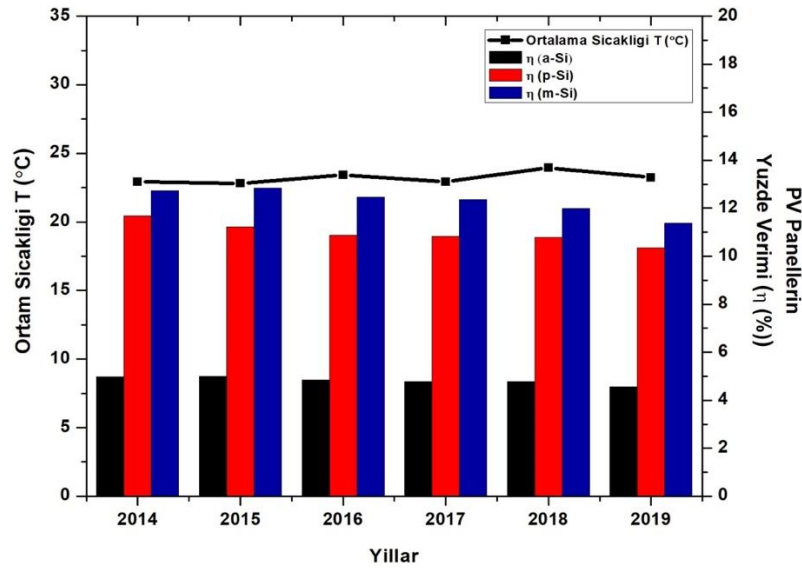
Şekil 10’da günlük ortalama toplam ışınım miktarının, fotovoltaik panellerinin verimi ile karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 10.** 2014-2019 yılları yaz ayları günlük ortalama toplam ışınım miktarının fotovoltaik panellerinin verimi ile karşılaştırılması.

Şekil 10’da görüldüğü üzere Düzce için 2015 yılı hariç diğer 5 yılın toplam ışınım miktarının yaklaşık olarak aynı değerde olduğu sonucu elde edilmiştir. Yapılan çalışmada 2015 yılı değerlerindeki farklılık panellerin enerji üretiminde, ışınım miktarında, performans ve verimlerinde göze çarpmaktadır. Düzce gibi yılın çoğu günü bulutlu ve yağışlı geçen şehir için 2015 yılı sıcaklık oranının yüksek olduğu hem panellerin verimlerinden hem de meteorolojik verilerden görülmektedir.

Ülkemizin coğrafik konumu sayesinde genel olarak ortam sıcaklığı fotovoltaik panellerin verimli çalışmasına uygundur. Düzce ise ülkemizin en çok yağış alan bölgesinde bulunan bir şehir olduğu için günlük ortam sıcaklığının panellerin verimleri üzerindeki etkisini bu çalışmayla gösterilmiştir. Bu bağlamda, Şekil 11’de 2014-2019 yılları yaz ayları günlük ortalama sıcaklık ve fotovoltaik panellerin yüzde verimleriyle karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 11.** 2014-2019 yılları yaz ayları günlük ortalama sıcaklığın fotovoltaik panellerin yüzde verimleriyle karşılaştırılması.

Şekil 11’den anlaşılacağı üzere Düzce şehri için yaz ayları ortam sıcaklığı günlük ortalaması yaklaşık 25°C olup fotovoltaik panellerin analizlerinden elde edilen verilerin ortalama verim değerleri ise a-Si için % 4,8, p-Si için % 10,9 ve m-Si % 12,29 şeklinde hesaplanmıştır. Ayrıca analizde elde edilen ve yukarıda belirtilen sıcaklık değeri, yaz ayları ortam sıcaklığının günlük ortalaması, fotovoltaik panellerinin verimliliklerinin en yüksek olarak çalıştığı STK (Standart Test Koşulları)’na uymaktadır. Şekil 11’de görüldüğü gibi, fotovoltaik panellerinin verimi sıcaklığa bağlı olarak gösterildiğinde Düzce yaz ayları fotovoltaik panellerin verimleri için oldukça uygundur. Ayrıca Tablo 4’te fotovoltaik panellerin yaz ayları için yıllık ortalama verimleri her üç panel için ayrı ayrı listelenmiştir.

**Tablo 4.** DUBİT çatısındaki a-Si, p-Si, m-Si fotovoltaik panellerinin yaz ayları için yıllık ortalama yüzde verimleri.

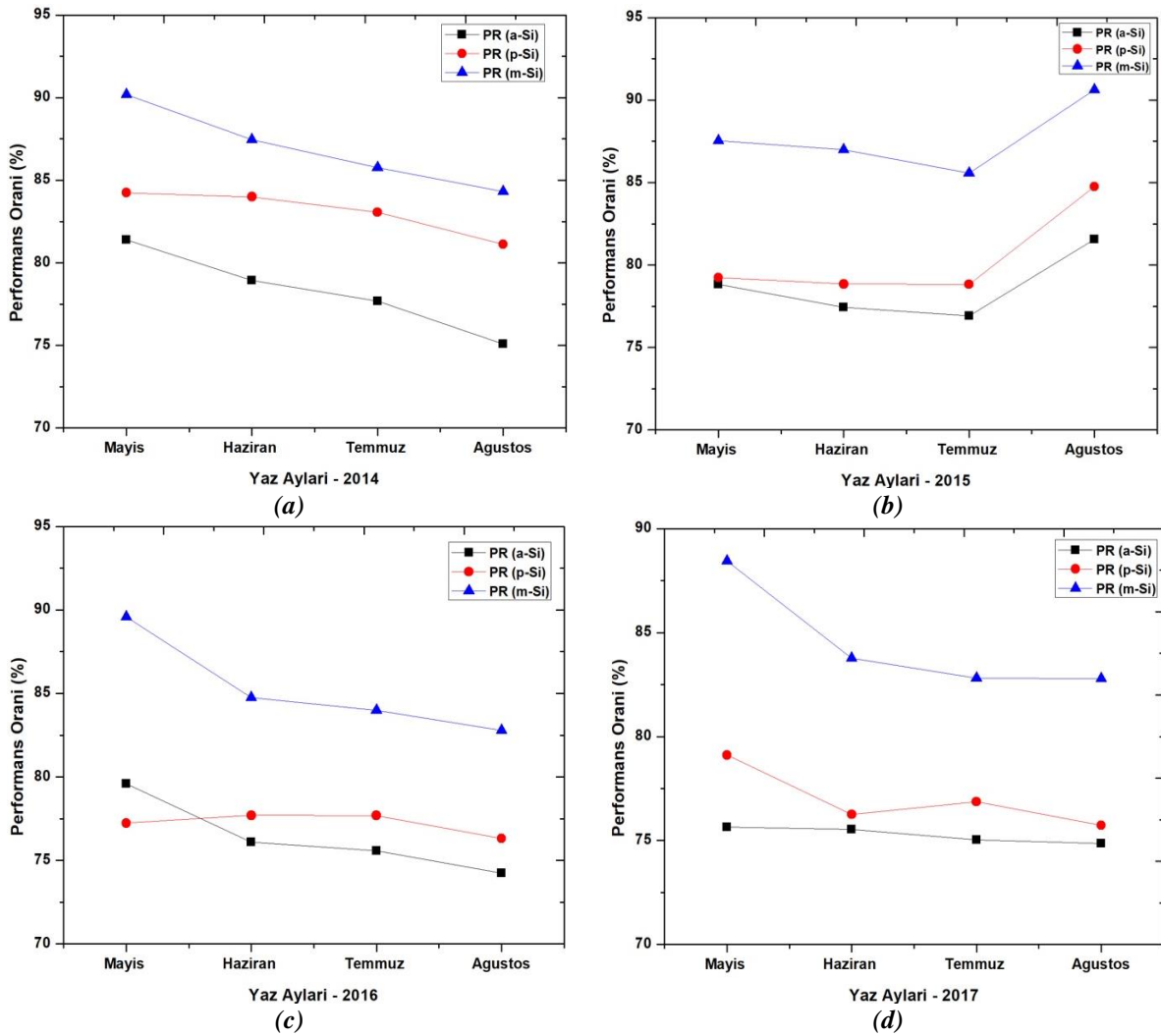
<b>Fotovoltaik Paneller</b>			
<b>Yaz Ayları Yıllık Ortalama</b>	<b>a-Si (%)</b>	<b>p-Si (%)</b>	<b>m-Si (%)</b>
2014	4,96	11,6	12,7
2015	4,99	11,2	12,8
2016	4,84	10,9	12,4
2017	4,77	10,7	12,3
2018	4,78	10,7	11,9
2019	4,55	10,3	11,3

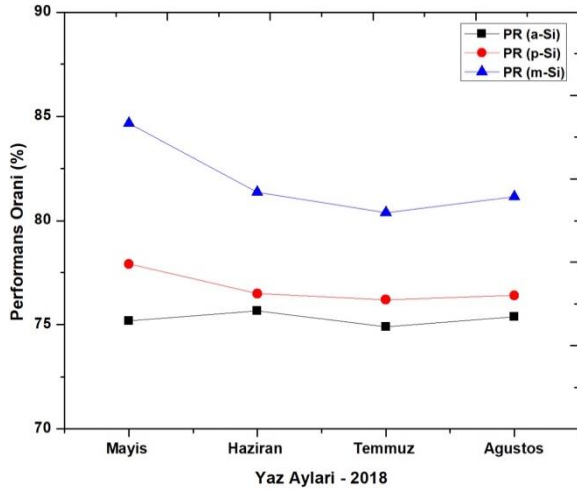
Tablo 4’te görüldüğü gibi fotovoltaik panellerin 2015 yılında verimlerinin diğer yıllardan daha yüksek olduğu görülmektedir.

Yaptığımız çalışmada güneş panellerinin performansları da ayrıca hesaplanmış ve yıllara göre kıyaslaması yapılmıştır. Kullanılan fotovoltaik panellerin yıl boyunca üzerlerine düşen toplam ışınım miktarları ( $I_T$ ) Eş. (1) ve performans oranları ( $P_R$ ) Eş. (7) kullanılarak hesaplanmıştır.

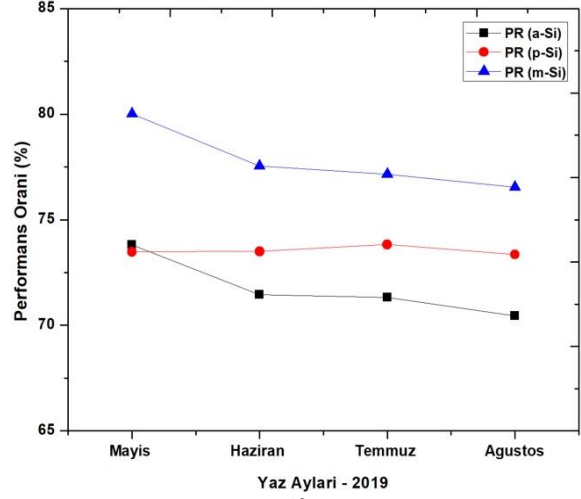
$$P_R = \frac{Y_f}{I_R} \quad (7)$$

Burada,  $P_R$  performans oranı,  $Y_f$  verim,  $I_R$  toplam ışınımın normalize hali,  $I_T$  yüzeye düşen toplam ışınım miktarı,  $I_R$  ise toplam ışınımın normalizesidir. Fotovoltaik panellerin performans oranları yukarıdaki denklemlerden faydalanarak ayrı ayrı hesaplanmış olup Şekil 12’de fotovoltaik panellerin 2014-2019 yılları yaz ayları performans oranları gösterilmiştir.





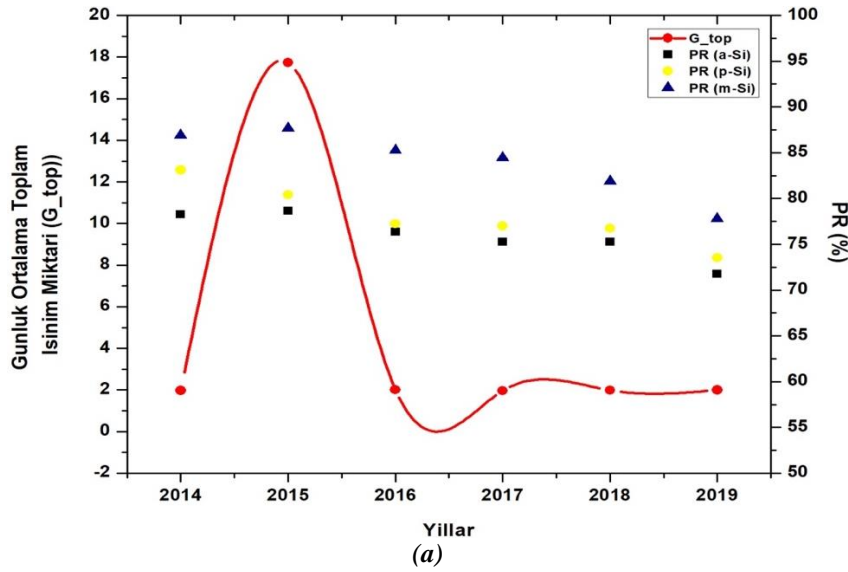
(e)



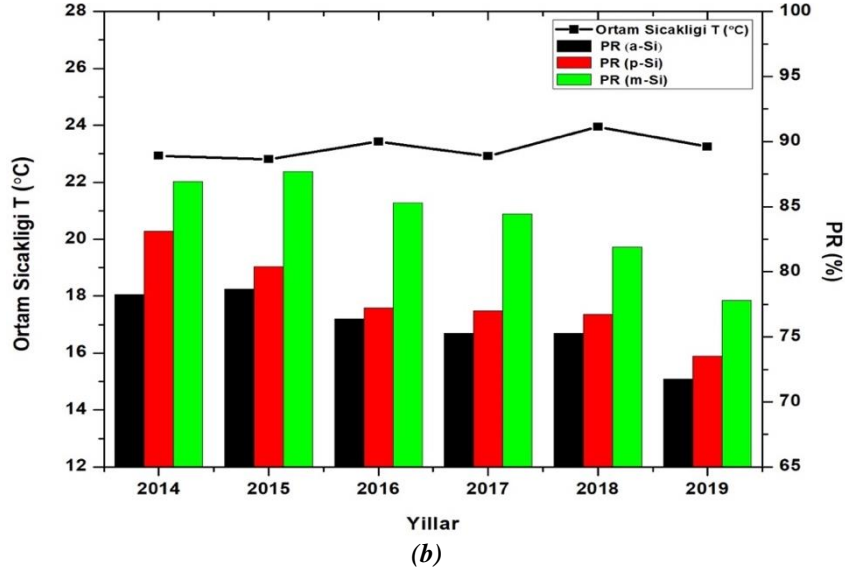
(f)

**Şekil 12.** Üç farklı türden fotovoltaik panellerinin yıllara göre yaz ayları performans oranlarının gösterimi ; (a) 2014, (b) 2015, (c) 2016, (d) 2017, (e) 2018 ve (f) 2019.

Şekil 12’de belirtildiği üzere yapılan analizlerde fotovoltaik panellerin yaz ayları için ortalama yıllık performans değerleri a-Si için % 75,9, p-Si için % 78,0 ve m-Si % 84,0 olarak hesaplanmıştır. Şekil 12’de açıkça görüldüğü gibi fotovoltaik panellerin tümü için panel tipinden bağımsız olarak 2015 yılında en yüksek performansı gösterdiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, Şekil 12’de fotovoltaik paneller arasında performansı en yüksek olan panelin m-Si fotovoltaik paneli olduğu tüm yıllar için görülmektedir. Ayrıca, bu çalışmada fotovoltaik panellerin performansı, panellerin günlük ortalama ışınım miktarı ve ortam sıcaklığı ile karşılaştırılmış olup Şekil 13’te gösterilmiştir.



(a)



**Şekil 13.** (a) Günlük ortalama toplam ışınım miktarının yıllara ve fotovoltaik panellerinin performansına göre dağılımı, (b) Günlük ortam sıcaklığının yıllara ve fotovoltaik panellerinin performans oranına göre dağılımı.

Şekil 13a’da yaz ayları için günlük ortalama ışınım miktarının yıllara ve fotovoltaik panellerin performansına göre dağılımı verilmiştir. Şekil 13b’de ise panellerin ortam sıcaklığının yıllara göre fotovoltaik panellerin performansına göre dağılımı gösterilmiştir. Grafiklerden anlaşıldığı gibi, m-Si fotovoltaik panelinin performansının tüm yıllara en yüksek performans gösterilmiştir. Özellikle 2015 yılında yaklaşık olarak % 85 performans ile çalıştığı maksimum ışınım miktarı olarak hesaplanmıştır.

### III. SONUC

Sunulan çalışmada, DÜBİT çatısında bulunan üç farklı tip (a-Si, p-Si, m-Si) fotovoltaik panellerin; ortalama enerji değerleri, ışınım miktarları, ortam sıcaklıkları, panel sıcaklıkları, verimleri ve performansları için 5 dakikada bir data-logger tarafından kaydedilen veriler kullanılmıştır. Kullanılan veriler, 2014’den yılından 2019 yılı da dahil olmak üzere toplam 6 yıllık fotovoltaik panellerden elde edilmiştir. Analizi yapılan panellerin ortam sıcaklığı TFA 35.1077 cihazı ile ölçülmüştür ve tüm yıllar için ortalama günlük sıcaklık  $22,93^{\circ}\text{C}$  ile  $23,94^{\circ}\text{C}$  arasında değiştiği hesaplanmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, fotovoltaik panellerin ışınım miktarının toplam ortalama değeri en yüksek 2015 yılında ve  $202,16 \text{ kWh/m}^2$  olarak hesaplanmıştır. Toplam ışınım miktarının en düşük olduğu yıl ise  $196,16 \text{ kWh/m}^2$  değeri ile 2017 yılı olduğu yapılan çalışmada görülmektedir.

Panellerin ürettiği enerji miktarlarına bakıldığında, fotovoltaik panellerin enerjisinin en yüksek olduğu yıl 2015 yılı olduğu görülmektedir. 2015 yılında, a-Si fotovoltaik panelinin yıllık ürettiği ortalama enerji  $12,19 \text{ kW}$ , p-Si panelinin  $12,47 \text{ kW}$  ve m-Si panelinin ürettiği yıllık ortalama enerji ise  $13,26 \text{ kW}$  olarak ölçülmüştür.

Bunun yanı sıra, fotovoltaik panellerin verimlerinin yıllık ortalama değerlerinin ölçümü sonucu sırasıyla, a-Si için % 4,8, p-Si için % 10,9 ve m-Si % 12,29 şeklinde hesaplanmıştır. Panellerin en verimli olduğu yılın yine 2015 yılı olduğu hesaplamalar sonucunda gözlemlenmiştir. 2015 yılı için a-Si fotovoltaik panelinin verimi % 4,99, p-Si panelinin verimi % 11,2 ve m-Si panelinin verimi de % 12,8 olarak hesaplanmıştır.

Fotovoltaik panellerin performans oranları kıyaslandığında ise yine 2015 yılında her üç panelinde performansı diğer yıllara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Panellerin 2015 yılı performansı sırasıyla; a-Si % 78,6, p-Si paneli % 80,4 ve m-Si paneli % 87,6 olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak, çalışmada kullanılan üç farklı tip fotovoltaik panelin verim ve performans değerleri 2014-2019 yılları yaz ayları için kıyaslandığında, en yüksek verim ve performansın 2015 yılında elde edildiği görülmüştür. Buna ilaveten, yapılan tüm analizler ışığında, incelenen üç farklı tip fotovoltaik panel arasından Düzce ili iklim koşullarında, üretilen enerji miktarı, performans ve verim açısından en yüksek potansiyeli m-Si fotovoltaik paneli gösterirken, en düşük değerleri ise a-Si paneli göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, Düzce gibi yazları ılık, yağışlı ve nemli geçen şehirler ve ülkeler için, bu üç farklı fotovoltaik panelin verim ve performans değerlerinin karşılaştırılması konusunda bir referans niteliğindedir.

#### **IV. KAYNAKLAR**

- [1] W. Fulkerson, R. R. Judkins, and M. K. Sanghvi, "Energy from fossil fuels," *Scientific American*, vol. 263 , no. 3, pp. 128–135, 1990.
- [2] G. Akin, "Küresel ısınma, nedenleri ve sonuçları," *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, vol. 46, no. 2, Art. no. 2, 2017.
- [3] SK. A. Shezan et al., "Performance analysis of an off-grid wind-PV (photovoltaic)-diesel-battery hybrid energy system feasible for remote areas," *Journal of Cleaner Production*, vol. 125, pp. 121–132, 2016.
- [4] J. Antonanzas, N. Osorio, R. Escobar, R. Urraca, F. J. Martinez-de-Pison, and F. Antonanzas-Torres, "Review of photovoltaic power forecasting," *Solar Energy*, vol. 136, pp. 78–111, 2016.
- [5] L. Szabó, "The history of using solar energy", 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS), Romania, 2017, pp. 1–8.
- [6] A.R. Dal, "Güneş enerji panellerindeki optimum eğim açısının verime etkisinin incelenmesi." *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c.8, s.1, 2021.
- [7] A. S. Papadogiannis, N. S. Papadogianni, A. Carabelas, S. Tsitomeneas, P. Kyraggelos, and T. G. Chondros, "The mirror weapon in archimedes era," in *Proceedings of EUCOMES 0* , pp. 29–36, 2009.
- [8] H. Spanggaard and F. C. Krebs, "A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 83, no. 2, pp. 125–146, 2004.
- [9] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power," *Journal of Applied Physics*, vol. 25, no. 5, pp. 676–677, 1954.
- [10] İ. Kayri, "Güneş panelleri ile üretilen enerjinin ortam bilgileri kullanılarak yapay sinir ağlarıyla tahmini", Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2017.
- [11] J. Mundo-Hernández, B. de Celis Alonso, J. Hernández-Álvarez, and B. de Celis-Carrillo, "An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 639–649, 2014.



- [12] M. Y. Zargar, M. Mufti, and S. A. Lone, "Modelling and control of wind solar hybrid system using energy storage system", 2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), India, 2016, pp. 965–970.
- [13] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2021, 5, Nisan). "T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2019-2023 Stratejik Plan" [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.enerji.gov.tr/merkeziteskilatlar>
- [14] Seda Cebesli, "Türkiye’de Güneş enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyelinin Değerlendirilmesi", TC. Kalkınma Bakanlığı, Türkiye, Yıllık Değerlendirme Raporu, 2017.
- [15] Düzce İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (2021, 05, Nisan). "İklimi ve bitki örtüsü." [Çevrimiçi]. Erişim: <https://duzce.ktb.gov.tr/TR-211369/iklimi-ve-bitki-ortusu.html>
- [16] Ü. Koç , "Güneş enerjisi ve ekonomik büyüme", *Ekonomi Politika ve Finans Araştırmaları Dergisi*, c. 6i s.2, ss.515-533, 2021.
- [17] Düzce Ticaret Borsası, (2021, 05 Nisan). "Düzce Hakkında" [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.duzcetb.org.tr/icerik/duzce-hakkinda>
- [18] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2021, 5, Nisan). "T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Merkezi Teşkilatlar." [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.enerji.gov.tr/merkeziteskilatlar>
- [19] E. Elibol, Ö. T. Özmen, N. Tutkun, and O. Köysal, "Outdoor performance analysis of different PV panel types," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 651–661, 2017.
- [20] C. Cañete, J. Carretero, and M. Sidrach-de-Cardona, "Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions," *Energy*, vol. 65, pp. 295–302, 2014.
- [21] T. Minemoto, Y. Nakada, H. Takahashi, and H. Takakura, "Uniqueness verification of solar spectrum index of average photon energy for evaluating outdoor performance of photovoltaic modules," *Solar Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1294–1299, 2009.
- [22] A. Massi Pavan, A. Mellit, and D. De Pieri, "The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants," *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 1128–1136, 2011.
- [23] P. G. V. Sampaio and M. O. A. González, "Photovoltaic solar energy: conceptual framework," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 590–601, 2017.
- [24] K. Mertens, "Photovoltaics fundamentals technology and practice", Wiley, 2nd ed., New York, NY, USA: Wiley, 2018, pp. 83-86.
- [25] R. Garner, (2021, Apr. 05). "Solar irradiance" NASA, [Online]. Available:[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/sdo/science/solar-irradiance.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/sdo/science/solar-irradiance.html)
- [26] A. Massi Pavan, A. Mellit, and D. De Pieri, "The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants," *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 1128–1136, 2011.
- [27] D. Micheli, S. Alessandrini, R. Radu, and I. Casula, "Analysis of the outdoor performance and efficiency of two grid connected photovoltaic systems in northern Italy," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 436–445, 2014.
- [28] J. H. So, Y. S. Jung, G. J. Yu, J. Y. Choi, and J. H. Choi, "Performance results and analysis of 3kW grid-connected PV systems," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 11, pp. 1858–1872, 2007.

- [29] A. Tahri, S. Silvestre, F. Tahri, S. Benlebna, and A. Chouder, "Analysis of thin film photovoltaic modules under outdoor long term exposure in semi-arid climate conditions," *Solar Energy*, vol. 157, pp. 587–595, 2017.
- [30] Y. Su, L.-C. Chan, L. Shu, and K.-L. Tsui, "Real-time prediction models for output power and efficiency of grid-connected solar photovoltaic systems," *Applied Energy*, vol. 93, pp. 319–326, 2012.
- [31] M. Malvoni, A. Leggieri, G. Maggiotto, P. M. Congedo, and M. G. De Giorgi, "Long term performance, losses and efficiency analysis of a 960kWP photovoltaic system in the Mediterranean climate," *Energy Conversion and Management*, vol. 145, pp. 169–181, 2017.
- [32] A. J. Carr and T. L. Pryor, "A comparison of the performance of different PV module types in temperate climates," *Solar Energy*, vol. 76, no. 1, pp. 285–294, 2004.