

## EĞRİ UYDURMA TEKNİĞİNE DAYALI YENİ BİR YÖNTEMLE FOTOVOLTAİK PANELLERİN SICAKLIK KATSAYILARININ ELDE EDİLMESİ

Ali ŞENTÜRK\*<sup>ib</sup>

Alınma: 16.10.2019; düzeltme: 10.12.2019; kabul: 10.03.2020

**Öz:** Bu çalışmada, fotovoltaik panellerin performans parametrelerine (kısa-devre akımı, açık-devre gerilimi ve maksimum çıkış gücü) ait sıcaklık katsayılarını elde etmek için yeni bir yöntem ortaya konmuştur. Eğri uydurma tekniğine dayanan bu yeni yöntem, ölçülen ve hesaplanan performans parametreleri arasındaki en küçük hata değerlerini sağlayan sıcaklık katsayılarını elde etmektedir. Yeni yöntem silikon tabanlı bir fotovoltaik panel için test edilmiştir. Bu panelin; yeni yöntemden elde edilen sıcaklık katsayıları ve kataloğunda sunulan sıcaklık katsayıları dış ölçülen performans parametreleri kullanılarak ortalama karekök hata yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yeni yöntemden elde edilen sıcaklık katsayılarının, katalog sıcaklık katsayılarından daha iyi bir doğrulukla performans parametrelerinin sıcaklık bağımlılığını ifade ettiği ortaya konmuştur. Mevcut yöntemlerden farklı olarak, yeni yöntem sıcaklık katsayılarını elde etmek için sabit parametrelere, belirli kısıtlamalara veya ilave bir deneysel düzeneğe ihtiyaç duymamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** sıcaklık katsayısı, fotovoltaik panel, performans parametreleri

### A New Method Based On Curve Fitting Technique To Assess The Temperature Coefficients Of Photovoltaic Modules

**Abstract:** In this study, a new method is introduced to obtain the temperature coefficients of performance parameters (short-circuit current, open-circuit voltage and the output peak power) of photovoltaic modules. This new method based on the curve fitting technique obtains the temperature coefficients that guaranty the smallest error values between measured and calculated performance parameters. The new method has been tested for a silicon-based photovoltaic module. The temperature coefficients obtained from the new method and the datasheet-supplied temperature coefficients of this module are compared with each other by using performance parameters measured in the field through root mean square error tool. As a result, it has been concluded that temperature coefficients obtained from the proposed new method express the temperature dependency of the performance parameters more accurately than the data-sheet supplied temperature coefficients. Unlike existing methods, the new method does not require fixed parameters, specific constraints, or an additional experimental setup to obtain temperature coefficients.

**Keywords:** temperature coefficient, photovoltaic module, performance parameters

\*Ali ŞENTÜRK, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Kötekli Mahallesi, Muğla, Türkiye, 48170 (alisen@mu.edu.tr).

## 1. GİRİŞ

Ticari olarak temin edilebilen fotovoltaik panellerin elektriksel çıktısını hesaplayabilmek için ışınım ( $G$ ) ve panel sıcaklığına ( $T_M$ ) bağlı olarak değişen ve performans parametreleri olarak adlandırılan; kısa-devre akımının ( $I_{SC}$ ), açık-devre geriliminin ( $V_{OC}$ ) ve maksimum çıkış gücünün ( $P_M$ ) bilinmesi gereklidir (Osterwald, 1986). Böylece kullanıcılar veya yatırımcılar, kurulumu yapılacak olan fotovoltaik panellerin üreteceği elektriksel çıktıyı doğru bir şekilde ön görerek, gerçekçi bir yatırım maliyeti yapabilir ve makul bir geri dönüşüm süresi elde edebilirler (Sentürk ve Eke, 2017). Fotovoltaik panel üreticileri, ışınımın  $1000 \text{ W/m}^2$ , panel sıcaklığının  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ve spektral dağılımın 1.5AM (airmass) olduğu ve standart test koşulları olarak adlandırılan çalışma şartları altında ölçülen performans parametrelerini ( $P_{M\_STC}$ ,  $V_{OC\_STC}$  ve  $I_{SC\_STC}$ ) kullanıcılara sunmaktadırlar (Şentürk, 2018a). Oysa fotovoltaik panellerin konumlandırıldığı dış ortamda bu standart test koşulları aynı anda geçerli değildir. Bu nedenle, standart test koşullarındaki performans parametrelerinin güncel değerleri, ışınım ( $G$ ) ve panel sıcaklığına ( $T_M$ ) bağlı olarak hesaplanmalıdır (Paulescu ve diğ., 2014). Rapor edilen mevcut yöntemlerin tamamına yakını fotovoltaik panellerin elektriksel çıktısını hesaplayabilmek için ışınım ve sıcaklığın birer fonksiyonu olan güncel performans parametrelerine ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$ ) ihtiyaç duymaktadırlar (Şentürk, 2018b; Skoplaki ve Palyvos, 2009).

Performans parametrelerinin ışınım bağımlılığı açıkça ifade edilir. Bir başka ifade ile değişen ışınımına karşın performans parametrelerinin güncel değerlerini hesaplayabilmek için ilave bir sabite veya ek bir bilgiye gerek yoktur. Diğer yandan, performans parametrelerinin sıcaklık bağımlılığı, sıcaklık katsayısı olarak adlandırılan önemli bir parametreye ile ifade edilmektedir. Sıcaklık katsayısı kavramı; değişen panel sıcaklığına bağlı olarak performans parametrelerinin ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$ ) değişimini tanımlamaktadır (Dupré, 2015). Kısa-devre akımı sıcaklık katsayısı ( $\alpha$ ), açık-devre gerilimi sıcaklık katsayısı ( $\beta$ ) ve maksimum çıkış devre sıcaklık katsayısı ( $\gamma$ ) olmak üzere toplamda üç adet sıcaklık katsayısı fotovoltaik panel kataloglarında kullanıcılara sunulmaktadır.

Sıcaklık katsayılarının ardında yatan fiziksel mekanizmalar birbirlerinden oldukça farklıdır (Dupré ve diğ., 2015; Green, 2003). Kısa devre akımı sıcaklık katsayısını belirleyen temel parametreler, toplanma oranı, üretilen ideal akım ve spektrum etkileridir. Genellikle kısa devre akımının sıcaklıkla olan değişimi oldukça azdır. Buna karşın fotovoltaik panellerin sıcaklık bağımlılığı açık-devre geriliminin sıcaklık bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Maksimum çıkış gücünün sıcaklık bağımlılığı ise kısa-devre akımının ve açık devre geriliminin sıcaklık bağımlılıklarının bir bileşimi olarak ortaya çıkmaktadır. Teorik olarak, sıcaklık katsayılarını hesaplamak için gerekli olan fiziksel parametrelere ulaşmak oldukça zordur ve karmaşık ifadelerle hesaplanmaktadırlar (Şentürk ve Eke, 2018). Esasında sıcaklık katsayılarının kendileri de sıcaklığın bir fonksiyonudurlar. Ancak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, fotovoltaik panellerin sahadaki çalışma sıcaklığı aralıkları dikkate alındığında, sıcaklık katsayılarının sabit kaldıkları bildirilmiştir (Perraki, 2013). Bu durumda, performans parametrelerinin sıcaklık bağımlılığını ifade edebilmek için birer adet sıcaklık katsayısı yeterli olmaktadır (Şentürk, 2016).

Kataloglarda kullanıcılara sunulan sıcaklık katsayıları ( $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$ ); iç veya dış ortam ölçümlerinden elde edilmektedirler. İç ortam ölçümleri için sıcaklık kontrollü bir ortama/odaya, sabit bir ışınım ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) ve bir spektral dağılım (hava kütlesi:AM1.5) değeri elde edebilmek için ise güneş enerjisi simülatörüne ihtiyaç vardır. Belirlenen bir sıcaklık aralığı için fotovoltaik panel sıcaklığı değiştirilerek, belirli zaman aralıklarında ilgili panelin akım-gerilim (I-V) eğrileri değişen panel sıcaklığına karşı ölçülür. Dış ortam ölçümlerinde ise değişken panel sıcaklığı gölgelendirme tekniği ile elde edilmektedir. Fotovoltaik panel saydam olmayan bir örtü ile örtülmek suretiyle gölgelendirilerek, panel sıcaklığının çevre sıcaklığına gelmesi beklenir. Gölgelemenin ortadan kaldırılmasıyla, çevre sıcaklığından çalışma sıcaklığına kadar fotovoltaik panel için bir sıcaklık farkı edilmiş olur (van Dyk ve diğ., 2000). Bu esnada panelin I-V eğrileri değişen panel sıcaklığına karşı ölçülür. Dış ortam ölçümleri, ışınımın en yüksek olduğu öğlen saatlerinde ve rüzgar hızının  $2 \text{ m/s}$  'den az olduğu açık bir günde gerçekleştirilmektedir (Fanney

ve diğ., 2006; Şentürk, 2016). İç veya dış ortam ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı I-V eğrileri ve regresyon tekniği kullanılarak ilgili performans parametrelerinin sıcaklık katsayıları hesaplanmaktadır (Şentürk, 2016). Ölçülen I-V eğrilerinden elde edilen  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$  değerleri panel sıcaklığına karşı çizdirilir. Bir çizim programının yardımı (Origin veya MS Excel) ile çizdirilen bu verilere birer çizgisel fonksiyon uydurulur. Bu çizgisel fonksiyonların eğimleri doğrudan ilgili performans parametrelerinin sıcaklık katsayılarına karşılık gelmektedir (Makrides ve diğ., 2009; Şentürk ve Eke, 2018). Buradan elde edilen sıcaklık katsayıları genellikle bağıl sıcaklık ( $A/^{\circ}C$ ,  $V/^{\circ}C$  ve  $W/^{\circ}C$ ) katsayıları olarak adlandırılırlar. Ancak, farklı tipte ve güçteki fotovoltaik panellerin sıcaklık katsayılarını karşılaştırabilmek için, bu bağıl sıcaklık katsayıları, ilgili parametrenin standart test koşullarındaki değerine bölünmek suretiyle mutlak sıcaklık katsayılarına ( $1/^{\circ}C$ ) dönüştürülmektedirler (Şentürk, 2016).

Hem iç hem de dış ortam ölçümlerinde sıcaklık katsayılarını elde etmek için belirli parametrelerin sabit olması veya belirli kısıtlamaların uygulanması gerekmektedir. Ne yazık ki fotovoltaik panellerin konumlandırıldığı dış ortamdaki çalışma şartları oldukça değişken olup bu sabit parametrelere veya kısıtlamalara karşılık gelmemektedir. Bu alanda gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda, sabit koşullar veya kısıtlamalar altında kontrollü olarak elde edilen ve kataloglar vasıtası ile kullanıcılara sunulan sıcaklık katsayılarının, dış ortamdaki değişken çalışma şartları altında katalog değerlerinden önemli ölçüde saptığı ve hatta işaret değiştirdikleri rapor edilmiştir. İç ve dış ölçümlerde uygulanan sabit koşullar veya belirli kısıtlamaların yanında katalog sıcaklık katsayılarındaki sapmaların bir diğer sebebi; sıcak-soğuk farkı, nem, fiziksel bozulmalar gibi etkenlerden dolayı dış ortamda konumlandırılan fotovoltaik panellerde zamanla gerçekleşen performans kayıplarıdır (Han ve diğ., 2018). Bu sebeple, belirli zaman aralıklarında, kataloglarda sunulan sıcaklık katsayılarının güncellenmesi, bir başka ifade ile yeniden hesaplanması/elde edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak mevcut yöntemlerden elde edilen ve kataloglarda sunulan sıcaklık katsayıları yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı, dış ortamda farklı koşullar altında çalışan fotovoltaik panellerin sıcaklık bağımlılığını ifade etmekte yetersiz kalmaktadırlar. Performans parametrelerinin sıcaklık bağımlılığını ifade eden doğru sıcaklık katsayılarının elde edilmesi oldukça önemlidir. Böylece kullanıcılar, kurulumu yapılacak olan bölgede fotovoltaik panel/panellerin üreteceği elektriksel çıktıyı daha doğru ve güvenilir bir şekilde hesaplamak suretiyle daha gerçekçi bir yatırım maliyeti ve geri dönüşüm süresi ön görüsü yapabileceklerdir.

Bu çalışmada, mevcut yöntemlerden farklı olarak, en iyi eğri uydurma tekniği kullanılarak fotovoltaik panellerin sıcaklık katsayılarını elde eden yeni bir yöntem sunulmuştur. Elde edilen sıcaklık katsayıları ile katalog katsayılarının karşılaştırılması ölçülen performans parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seçilen keyfi sıcaklık katsayıları için en iyi eğri uydurma işlemi ortalama mutlak karekök hata yaklaşımı ile sağlanmıştır. Yeni yöntemin geçerliliğini ortaya koymak için tek kristal silisyum teknolojisi ile üretilen bir adet fotovoltaik panel kullanılmıştır.

## 2. METOT

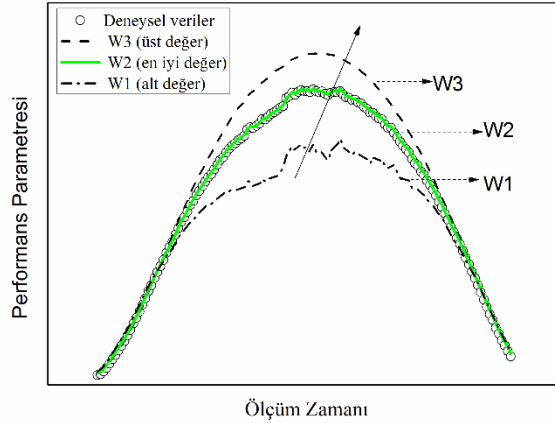
Performans parametrelerinin ışınım ve sıcaklık bağımlılıkları yaygın olarak kullanılan ve aşağıda belirtilen eşitlikler ile ifade edilmektedir (Senturk ve Eke, 2017). Bu ifadeler kullanılarak güncel performans parametreleri ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$ ) istenilen çalışma şartlarına ( $G$  ve  $T_M$ ) göre hesaplanmaktadır.

$$I_{SC} = I_{SC\_STC} \frac{G}{G_{STC}} (1 + \alpha(T_M - T_{REF})) \quad (1)$$

$$V_{OC} = V_{OC\_STC} \left( 1 + \beta(T_M - T_{REF}) + \frac{nN_s k_B T_M}{qV_{OC\_STC}} \ln \left( \frac{G}{G_{STC}} \right) \right) \quad (2)$$

$$P_M = \frac{P_{M\_STC} G}{G_{STC}} (1 + \gamma(T_M - T_{REF})) \quad (3)$$

Burada,  $P_{M\_STC}$ ; standart test koşullarındaki maksimum çıkış gücünü,  $V_{OC\_STC}$ ; standart test koşullarındaki açık-devre gerilimini,  $I_{SC\_STC}$ ; standart test koşullarındaki kısa-devre akımını,  $G_{STC}$ ;  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{REF}$ ;  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n$ ; fotovoltaik paneli oluşturan güneş gözesinin diyot çarpanı ve  $N_S$ ; fotovoltaik panel içerisinde seri olarak bağlı bulunan güneş gözesi sayısını ifade etmektedir. Bunun yanında  $q$ ; elektron yükünü ve  $k_B$ ; Boltzmann Sabitini tanımlamaktadır. Daha öncede belirtildiği üzere sıcaklık katsayıları ( $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$ ), panel sıcaklığı değıştikçe, güncel performans parametrelerini ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$ ) hesaplamak için kullanılmaktadırlar. Matematiksel olarak ise, panel sıcaklığı değıştikçe, hesaplanan performans parametrelerinin mümkün olabildiğince ölçülen performans parametrelerine yakın olmasını belirleyen bir parametredir. Bir başka ifade ile doğrusıcaklık katsayıları; ölçülen ve hesaplanan performans parametrelerinin aynı olması anlamına gelmektedir. Bu çalışmada ortaya konan yeni yöntemin amacı, ölçülen  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$  eğrileri ile örtüşen olası en iyi eğrilerin hesaplanmasını sağlayan sıcaklık katsayılarının elde edilmesidir. Yeni yöntemle sıcaklık katsayılarının elde edilmesi temsili olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu şekilde  $W1$ ,  $W2$  ve  $W3$  temsili sıcaklık katsayılarıdır.  $W1$  değerinden başlanarak,  $W3$  değerine doğru (Şekil 1'de gösterilen ok yönünde) farklı sıcaklık katsayıları için performans parametreleri ve hata değerleri hesaplanır. Ölçülen ile hesaplanan performans parametreleri arasındaki en küçük hatayı sağlayan sıcaklık katsayısı ( $W2$ ) ilgili performans parametresi için doğru sıcaklık katsayısı olarak kabul edilir.



**Şekil 1:**

*Yeni yöntemle sıcaklık katsayılarının elde edilmesi.*

Ölçülen ve hesaplanan performans parametreleri, Eşitlik (4)'te belirtilen ortalama karekök hata (OKKH) ifadesi kullanılarak karşılaştırılmıştır.

$$OKKH(\%) = 100 \sqrt{\frac{N \sum_{i=1}^N (PP_{ÖLÇ} - PP_{HES})^2}{\sum_{i=1}^N PP_{ÖLÇ}}} \quad (4)$$

Burada  $N$ ; veri sayısını,  $PP_{ÖLÇ}$ ; ölçülen performans parametresini ve  $PP_{HES}$ ; hesaplanan performans parametresini ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan keyfi sıcaklık katsayıları rapor edilen çalışmalar incelenerek belirlenmiştir (Marion ve diğr., 1999; Osterwald ve diğr., 1987). Bu doğrultuda, her bir sıcaklık

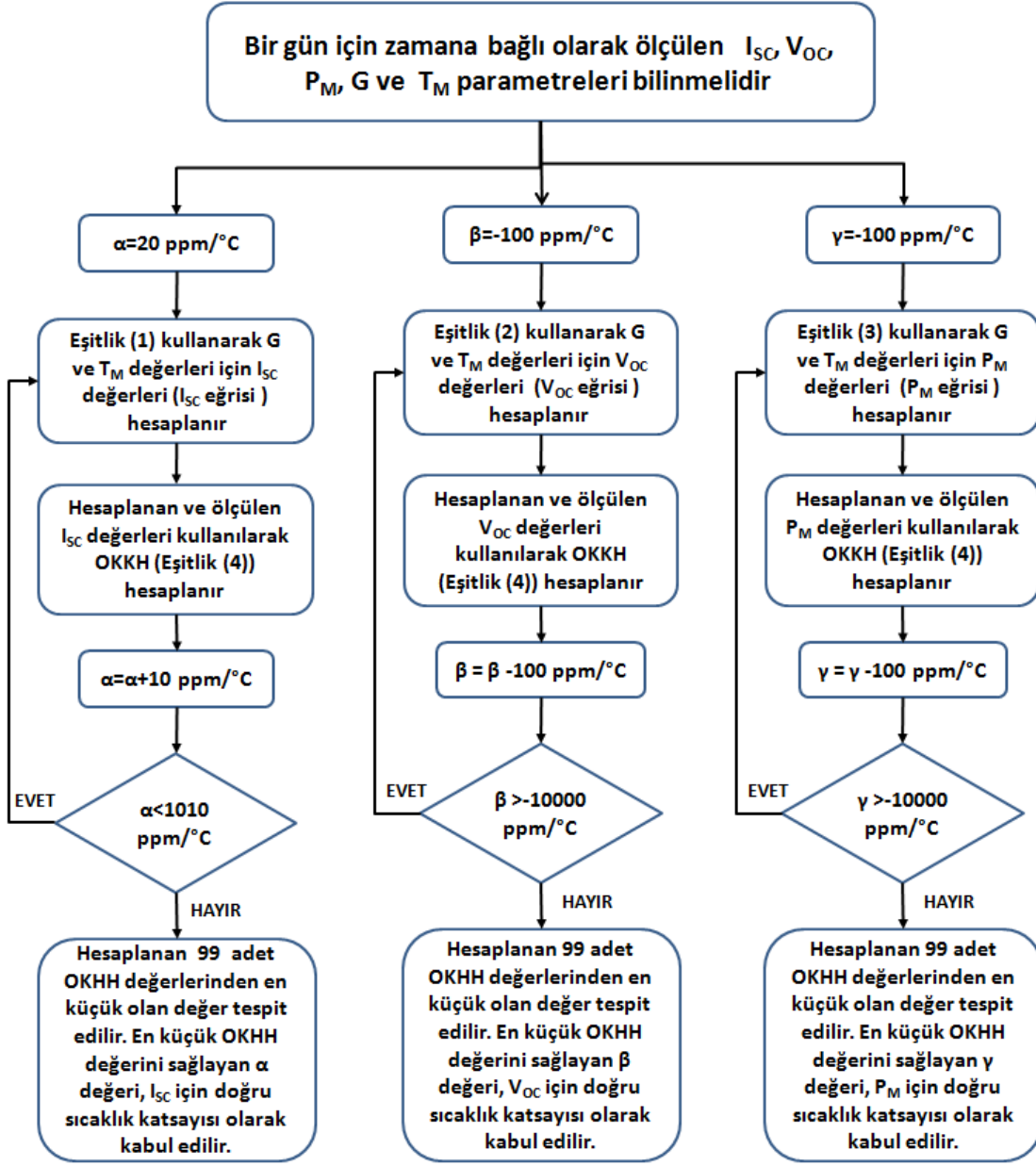
katsayısı ( $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$ ) için; bir üst değer, bir alt değer ve alt değerden üste değere olan artışı ifade eden bir artış adımı değeri belirlenmiş ve Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1. Sıcaklık Katsayı Değerleri.**

Sıcaklık Katsayıları	Alt değer (ppm/ °C)	Üst değer (ppm/ °C)	Artış Adımı (ppm/ °C)	Kullanılan değişken sayısı
$\alpha$ ; kısa-devre akımı sıcaklık katsayısı	20	1000	10	99
$\beta$ ; açık-devre gerilimi sıcaklık katsayısı	-100	-10000	100	99
$\gamma$ ; maksimum çıkış gücü sıcaklık katsayısı	-100	-10000	100	99

\*ppm bir çarpandır ve değeri  $10^{-6}$ 'dır.

Önerilen yeni yöntem kullanılarak bir fotovoltaiik panelin sıcaklık katsayılarını hesaplayabilmek için, ilgili panelin seçilen bir gün için zamana bağlı olarak çalışma koşullarının ( $G$  ve  $T_M$ ) ve performans parametrelerinin ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$ ) bilinmesi/ölçülmesi gereklidir. Daha sonrasında, zamana bağlı olarak ölçülen  $G$  ve  $T_M$  değerleri kullanılarak, Tablo 1'de belirtilen alt ve üst değerler ile artış adımlarına uygun olarak, Eşitlik (1)'in yardımıyla 99 adet farklı  $\alpha$  değerine karşılık gelen 99 adet  $I_{SC}$  eğrisi, Eşitlik (2)'nin yardımıyla 99 adet farklı  $\beta$  değerine karşılık gelen 99 adet  $V_{OC}$  eğrisi ve Eşitlik (3)'ün yardımıyla da 99 adet farklı  $\gamma$  değerine karşılık gelen 99 adet  $P_M$  eğrisi hesaplanır. Devamında, Eşitlik (4) ve ölçülen  $I_{SC}$  eğrisi kullanılarak, hesaplanan 99 adet  $I_{SC}$  eğrisinin her biri için bir ortalama karekök hata değeri (OKKH) olmak üzere toplamda 99 adet OKKH değeri hesaplanır. Benzer olarak, aynı işlem  $V_{OC}$  ve  $P_M$  eğrilerine de uygulanmak suretiyle, hesaplanan 99 adet  $V_{OC}$  eğrisi için 99 adet OKKH değeri ve hesaplanan 99 adet  $P_M$  eğrisi için de 99 adet OKKH değeri elde edilir. Son olarak, hesaplanan  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$  eğrilerine karşılık gelen OKKH değerlerinden en küçük olanlar belirlenir. En küçük OKKH değerlerini sağlayan ilgili sıcaklık katsayıları, performans parametreleri için doğru sıcaklık katsayıları olarak kabul edilir (EK: her bir performans parametresi için 99 adet sıcaklık katsayısı ve bunlara karşılık gelen 99 adet OKKH değeri. En küçük OKKH değeri ile en küçük OKKH değerini sağlayan sıcaklık katsayıları işaretlenmiştir). Önerilen yöntemin hesaplama adımları Şekil 2'de temsili olarak gösterilmiştir.



**Şekil 2:**  
Yeni yöntemle sıcaklık katsayılarının hesaplanması.

Tüm bu işlemler MS Vbasic ortamında yazılan bir bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir. Keyfi olarak seçilen sıcaklık sayılarının sayıca fazla olması nedeniyle çizdirilecek grafikte karmaşıklığa yol açacağından, seçilen bir gün için elde edilen sıcaklık sayıları ve ilgili OKKH değerleri çalışmanın sonunda EK başlığı altında tablo olarak verilmiştir.

### 3. BULGULAR

Önerilen yöntemin geçerliliğini ortaya koymak için bir adet tek kristal silisyum fotovoltaik panel kullanılmıştır. Bu panelin performans parametreleri ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$ ) ve çalışma koşulları ( $G$  ve  $T_M$ ) Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Menteşe Kütüphanesi'nde bulunan çok kanallı akım-gerilim eğrisi ölçme düzeneği kullanılarak 5 dakikalık aralıklarla ölçülmüştür (Eke ve Demircan, 2013). Rastgele seçilen iki gün için ölçülen çalışma şartları ( $G$  ve  $T_M$ ) Şekil 3'te ve Şekil 4'te belirtilmiştir. Bu günler için  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$  parametrelerinin sıcaklık katsayıları bu çalışmada ortaya konan yöntemle elde edilmiş olup Tablo 2'de verilmiştir. Eşitlik (1)-(3)'ü kullanarak seçilen fotovoltaik panelin performans parametrelerini hesaplamak için gerekli olan katalog bilgileri;  $P_{M\_STC}=99,7$  W,  $I_{SC\_STC}=6,0$  A,  $V_{OC\_STC}=21,6$  V,  $n=1,2$  ve  $N_S=32$ 'dir.

**Tablo 2. Yeni yöntem kullanılarak elde edilen sıcaklık katsayıları.**

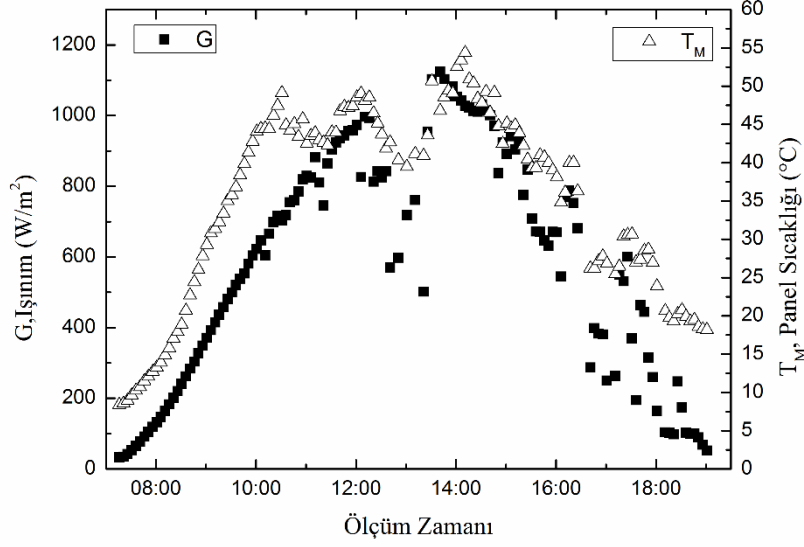
Seçilen Günler	$\alpha$ (ppm/ °C)	$\Delta\alpha$ (%)	$\beta$ (ppm/ °C)	$\Delta\beta$ (%)	$\gamma$ (ppm/ °C)	$\Delta\gamma$ (%)
1. Gün	10	$4,6 \times 10^{-2}$	2610	5,2	4400	0,9
2. Gün	10	$7,0 \times 10^{-2}$	2710	4,9	4400	1,0
Ortalama Değer	<b>10</b>		<b>2660</b>		<b>4400</b>	

\*ppm bir çarpandır ve değeri  $10^{-6}$ 'dır.

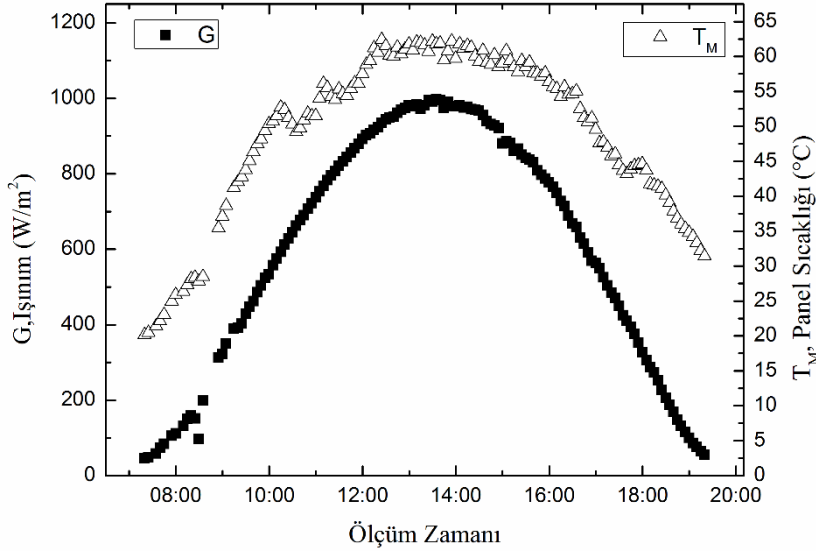
Tablo 2'de gösterilen hata değerleri ( $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$  ve  $\Delta\gamma$ ), ölçülen ve hesaplanan performans parametreleri arasındaki yakınlığı ifade eden en küçük OKHH değerleridir. Bu hata değerlerini sağlayan ilgili sıcaklık katsayıları yine aynı tabloda belirtilmiştir. Seçilen iki gün için elde edilen sıcaklık katsayılarının ortalaması alınmış ve çalışmanın geri kalan kısmında bu ortalama değerler kullanılmıştır. Yeni yöntemden elde edilen sıcaklık katsayıları ve katalogta sunulan sıcaklık katsayıları Tablo 3'de gösterilmiştir. Bu tabloya göre, yeni yöntemden elde edilen ve katalogta sunulan  $\gamma$  ve  $\beta$  sıcaklık katsayıları aynı mertebelerde olup birbirlerine yakın çıkmışlardır. Ancak, aynı durum kısa-devre sıcaklık katsayısı ( $\alpha$ ) için geçerli değildir. Bunun nedeni, kısa-devre akımının spektruma ve gelen foton akısına olan bağımlılığının, sıcaklık bağımlılığından daha güçlü olmasından kaynaklanmaktadır (Dupré ve diğ., 2015). Panel katalogunda sunulan kısa-devre sıcaklık katsayısı, iç ortamda sabit bir foton akısı ve sabit bir spektrum değeri (AM1.5) için elde edilmiştir. Oysa dış ortamda gelen foton akısı ve spektrum dağılımı zamanla oldukça değişkenlik göstermektedir. Sonuç olarak, yeni yöntemden elde edilen ve katalogta sunulan  $\alpha$  sıcaklık katsayıları birbirlerinden merteye olarak farklı değerler almışlardır.

Tablo 3'te gösterilen sıcaklık katsayıları doğrudan olarak birbirleri ile karşılaştırılmaz. Bunun nedeni, hangi tip sıcaklık katsayısının ( yeni yöntem ve katalog) doğru olup olmadığının bilinmemesidir (Şentürk ve Eke, 2018). Bunun yerine, yeni yöntemden elde edilen ve katalogta sunulan sıcaklık katsayıları için performans parametrelerinin hesaplanması ve ölçülen performans parametreleri ile karşılaştırılması yapılmalıdır. Karşılaştırma için seçilen iki günün dışında rastgele başka bir gün seçilmiştir. Seçilen bu gün için, tek kristal silisyum fotovoltaik panelin performans parametreleri ve çalışma koşulları 5 dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Ölçülen çalışma koşulları Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu gün için performans parametreleri ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$ ), yeni yöntemden elde edilen sıcaklık katsayıları (yeni yöntem SK) ve katalog sıcaklık katsayıları (katalog SK) için hesaplanmıştır. Ölçülen ve hesaplanan kısa-devre akımı ( $I_{SC}$ ), açık devre-

gerilimi ( $V_{OC}$ ) ve maksimum çıkış gücü ( $P_M$ ) değerleri ölçüm zamanına karşı çizdirilmiş ve sırası ile Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Yeni yöntemden elde edilen ve katalogda sunulan sıcaklık katsayıları kullanılarak elde edilen  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $P_M$  için hata değerleri Eşitlik (4) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 9'da belirtilmiştir. Şekil 9'da belirtilen hata değerleri dikkate alınmak suretiyle yeni yöntem ve katalog sıcaklık katsayılarının karşılaştırması yapılmıştır.



**Şekil 3:**  
Seçilen 1. gün için çalışma şartları.

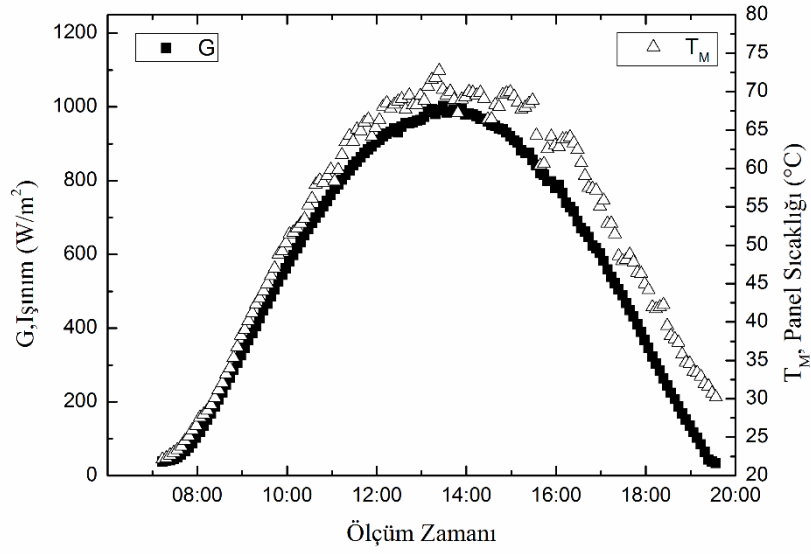


**Şekil 4:**  
Seçilen 2. gün için çalışma şartları.

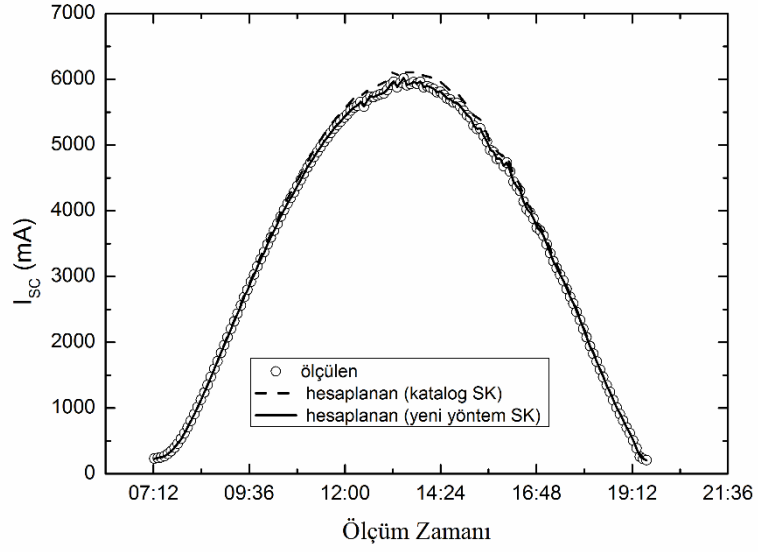


**Tablo3. Yeni yöntemle elde edilen ve katalogda sunulan sıcaklık katsayıları.**

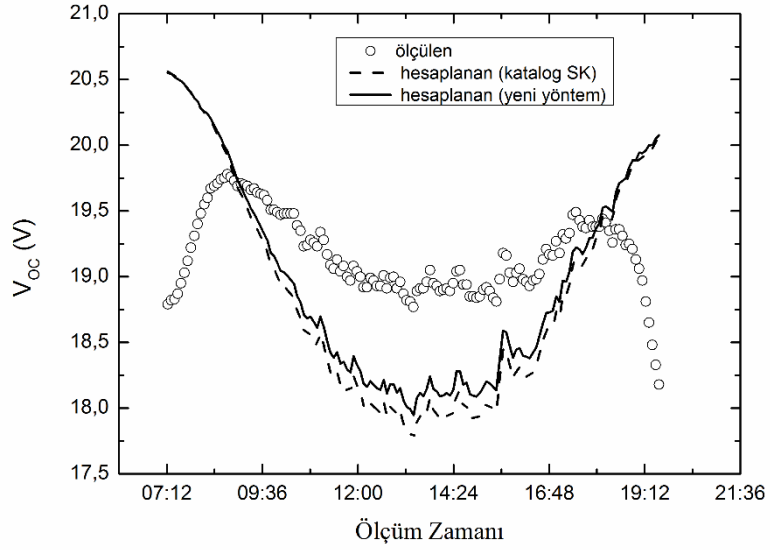
Sıcaklık Katsayıları	Yeni Yöntem (ppm/°C)	Katalog (ppm/°C)
$\alpha$ ; kısa-devre akımı sıcaklık katsayısı	10	600
$\beta$ ; açık-devre gerilimi sıcaklık katsayısı	-2660	-2800
$\gamma$ ; maksimum çıkış gücü sıcaklık katsayısı	-4400	-3800



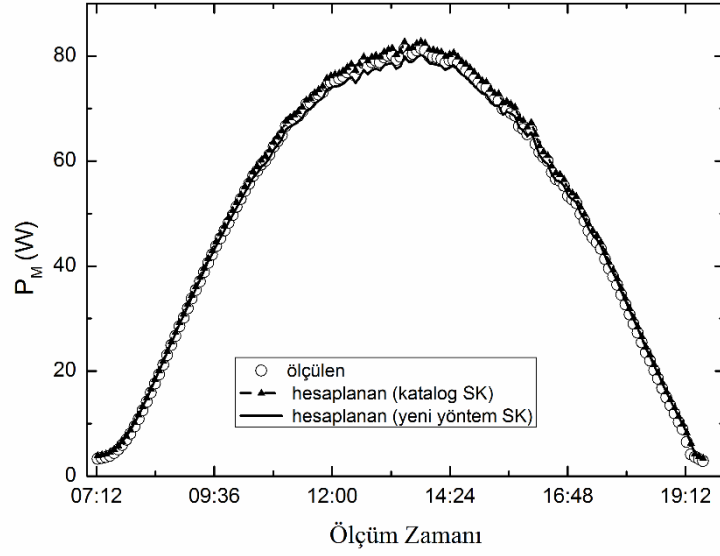
**Şekil 5:**  
*Karşılaştırma için seçilen güne ait çalışma koşulları.*



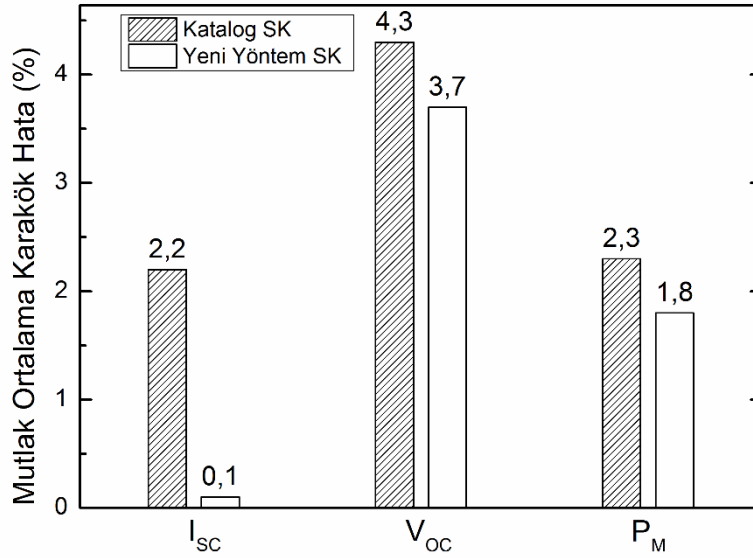
**Şekil 6:**  
*Ölçülen ve hesaplanan kısa-devre akımı değerleri.*



**Şekil 7:**  
*Ölçülen ve hesaplanan açık-devre gerilimi değerleri.*



**Şekil 8:**  
Ölçülen ve hesaplanan maksimum çıkış gücü değerleri.



**Şekil 9:**  
Farklı sıcaklık katsayıları için elde edilen performans parametrelerinin hata değerleri.

Şekil 9'dan da açıkça görüldüğü üzere, yeni yöntemden elde edilen sıcaklık katsayıları kullanılarak hesaplanan  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  ve  $P_M$  parametreleri için hata değerleri sırası ile % 0,1, % 3,7 ve % 1,8 iken, bu değerler katalog sıcaklık katsayıları için sırası ile % 2,2, % 4,3 ve % 2,3'tür. Her iki tip sıcaklık katsayısı (yeni yöntem SK ve katalog SK) için elde edilen hata değerleri literatürde bildirilen hata aralığı içerisinde kalmaktadır (Şentürk, 2016). Bunun yanında, önerilen yeni yöntem kullanılarak elde edilen sıcaklık katsayıları için hesaplanan performans parametrelerine ait hata değerleri, kataloglarda sunulan sıcaklık katsayıları için hesaplanan performans parametrelerine ait hata değerlerinden daha düşüktür. Bu bağlamda, yeni yöntemden elde edilen sıcaklık katsayılarının, katalogda sunulan sıcaklık katsayılarına göre, performans parametrelerini ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  ve  $P_M$ ) daha iyi bir doğrulukla hesapladığı anlaşılmıştır.

#### 4. SONUÇ

Dış ortamda konumlandırılan fotovoltaik panellerin üreteceği elektriksel çıktıyı daha hassas bir şekilde ön görebilmek, fotovoltaik panellerin değişken çalışma koşulları altındaki sıcaklık davranışını ifade edebilen doğru sıcaklık katsayılarının bilinmesine bağlıdır. Ortaya konan yeni yöntemden elde edilen sıcaklık katsayıları, katalog sıcaklık katsayılarından daha iyi bir hesaplama doğruluğu sunduğu sonucuna varılmıştır. Sıcaklık katsayılarını elde etmek için kullanılan klasik tekniklerden (iç ve dış ortam ölçümleri) farklı olarak, yeni yöntemin sahip olduğu artılar şu şekilde özetlenebilir. Yeni yöntemde, sıcaklık katsayılarını elde etmek veya güncellemek için sabit parametrelere (ışınım, spektral dağılım), uyulması gereken belirli kısıtlamalara (açık bir günde öğlen saatinde ve rüzgar hızı) veya ilave bir deneysel düzeneğe (gölgelendirme örtüsü veya sıcaklık kontrollü bir oda) ihtiyaç duyulmamaktadır. Önerilen yeni yöntem sayesinde kullanıcılar sadece ellerinde bulunan deneysel verileri kullanmak suretiyle ilgili fotovoltaik panellerin sıcaklık katsayılarını kolayca elde edebileceklerdir.

İleriye dönük olarak, önerilen yeni yöntemin geçerliliği daha çok sayıda örnekleme kümesi ve farklı tipteki fotovoltaik paneller için denenmelidir.

#### AÇIKLAMALAR

Bu çalışma Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından 08/10 and 13/181 kodlu projeler ile desteklenmiştir.

**EK:** Seçilen bir gün için ortalama mutlak karekök hata değerleri ve ilgili sıcaklık katsayıları. Her bir performans parametresi için en küçük hata değerini veren sıcaklık katsayısı gri renk ile işaretlenmiştir.

#	Hesaplanan ve ölçülen $I_{sc}$ hata değeri (%)	$\alpha$ (ppm/°C)	Hesaplanan ve ölçülen $V_{oc}$ hata değeri (%)	$\beta$ (ppm/°C)	Hesaplanan ve ölçülen $P_M$ hata değeri (%)	$\gamma$ (ppm/°C)
1	0	10	6,879	10	18,1	100
2	0,1	20	6,772	110	17,6	200
3	0,1	30	6,666	210	17,2	300
4	0,1	40	6,564	310	16,8	400
5	0,2	50	6,464	410	16,4	500
6	0,2	60	6,368	510	16,0	600
7	0,3	70	6,274	610	15,5	700
8	0,3	80	6,184	710	15,1	800
9	0,3	90	6,097	810	14,7	900
10	0,4	100	6,014	910	14,3	1000
11	0,4	110	5,935	1010	13,9	1100
12	0,4	120	5,859	1110	13,4	1200
13	0,5	130	5,788	1210	13,0	1300
14	0,5	140	5,721	1310	12,6	1400
15	0,5	150	5,658	1410	12,2	1500
16	0,6	160	5,599	1510	11,8	1600
17	0,6	170	5,545	1610	11,3	1700
18	0,7	180	5,497	1710	10,9	1800
19	0,7	190	5,452	1810	10,5	1900

20	0,7	200	5,413	1910	10,1	2000
21	0,8	210	5,379	2010	9,7	2100
22	0,8	220	5,351	2110	9,3	2200
23	0,8	230	5,327	2210	8,8	2300
24	0,9	240	5,309	2310	8,4	2400
25	0,9	250	5,297	2410	8,0	2500
26	0,9	260	5,290	2510	7,6	2600
27	1,0	270	5,288	2610	7,2	2700
28	1,0	280	5,292	2710	6,7	2800
29	1,1	290	5,302	2810	6,3	2900
30	1,1	300	5,317	2910	5,9	3000
31	1,1	310	5,337	3010	5,5	3100
32	1,2	320	5,363	3110	5,1	3200
33	1,2	330	5,394	3210	4,7	3300
34	1,2	340	5,430	3310	4,3	3400
35	1,3	350	5,471	3410	3,9	3500
36	1,3	360	5,517	3510	3,4	3600
37	1,3	370	5,568	3610	3,0	3700
38	1,4	380	5,624	3710	2,6	3800
39	1,4	390	5,684	3810	2,3	3900
40	1,5	400	5,749	3910	1,9	4000
41	1,5	410	5,818	4010	1,5	4100
42	1,5	420	5,891	4110	1,2	4200
43	1,6	430	5,968	4210	1,0	4300
44	1,6	440	6,049	4310	0,9	4400
45	1,6	450	6,134	4410	1,1	4500
46	1,7	460	6,222	4510	1,3	4600
47	1,7	470	6,314	4610	1,6	4700
48	1,7	480	6,409	4710	2,0	4800
49	1,8	490	6,507	4810	2,4	4900
50	1,8	500	6,608	4910	2,7	5000
51	1,9	510	6,711	5010	3,1	5100
52	1,9	520	6,818	5110	3,5	5200
53	1,9	530	6,927	5210	3,9	5300
54	2,0	540	7,038	5310	4,4	5400
55	2,0	550	7,152	5410	4,8	5500
56	2,0	560	7,268	5510	5,2	5600
57	2,1	570	7,386	5610	5,6	5700
58	2,1	580	7,506	5710	6,0	5800
59	2,1	590	7,628	5810	6,4	5900
60	2,2	600	7,752	5910	6,8	6000
61	2,2	610	7,878	6010	7,3	6100
62	2,3	620	8,005	6110	7,7	6200
63	2,3	630	8,134	6210	8,1	6300

64	2,3	640	8,264	6310	8,5	6400
65	2,4	650	8,396	6410	8,9	6500
66	2,4	660	8,530	6510	9,4	6600
67	2,4	670	8,664	6610	9,8	6700
68	2,5	680	8,800	6710	10,2	6800
69	2,5	690	8,937	6810	10,6	6900
70	2,5	700	9,075	6910	11,0	7000
71	2,6	710	9,214	7010	11,4	7100
72	2,6	720	9,354	7110	11,9	7200
73	2,7	730	9,496	7210	12,3	7300
74	2,7	740	9,638	7310	12,7	7400
75	2,7	750	9,781	7410	13,1	7500
76	2,8	760	9,925	7510	13,5	7600
77	2,8	770	10,070	7610	14,0	7700
78	2,8	780	10,215	7710	14,4	7800
79	2,9	790	10,362	7810	14,8	7900
80	2,9	800	10,509	7910	15,2	8000
81	2,9	810	10,657	8010	15,6	8100
82	3,0	820	10,805	8110	16,1	8200
83	3,0	830	10,954	8210	16,5	8300
84	3,1	840	11,104	8310	16,9	8400
85	3,1	850	11,255	8410	17,3	8500
86	3,1	860	11,405	8510	17,7	8600
87	3,2	870	11,557	8610	18,2	8700
88	3,2	880	11,709	8710	18,6	8800
89	3,2	890	11,861	8810	19,0	8900
90	3,3	900	12,014	8910	19,4	9000
91	3,3	910	12,168	9010	19,8	9100
92	3,3	920	12,322	9110	20,3	9200
93	3,4	930	12,476	9210	20,7	9300
94	3,4	940	12,631	9310	21,1	9400
95	3,5	950	12,786	9410	21,5	9500
96	3,5	960	12,942	9510	21,9	9600
97	3,5	970	13,098	9610	22,4	9700
98	3,6	980	13,254	9710	22,8	9800
99	3,6	990	13,411	9810	23,2	9900

## KAYNAKLAR

1. Dupré, O., 2015. Physics of the thermal behavior of photovoltaic devices To cite this version : HAL Id : tel-01368592 Physics of the thermal behavior of photovoltaic devices.
2. Dupré, O., Vaillon, R., Green, M.A., 2015. Physics of the temperature coefficients of solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 140, 92–100. doi:10.1016/j.solmat.2015.03.025
3. Eke, R., Demircan, H., 2013. Performance analysis of a multi crystalline Si photovoltaic module under Mugla climatic conditions in Turkey. *Energy Convers. Manag.* 65, 580–586. doi:10.1016/j.enconman.2012.09.007
4. Fanney, A.H., Davis, M.W., Dougherty, B.P., King, D.L., Boyson, W.E., Kratochvil, J. a., 2006. Comparison of Photovoltaic Module Performance Measurements. *J. Sol. Energy Eng.* 128, 152. doi:10.1115/1.2192559
5. Green, M.A., 2003. General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 11, 333–340. doi:10.1002/pip.496
6. Han, H., Dong, X., Li, B., Yan, H., Verlinden, P.J., Liu, J., Huang, J., Liang, Z., Shen, H., 2018. Degradation analysis of crystalline silicon photovoltaic modules exposed over 30 years in hot-humid climate in China. *Sol. Energy* 170, 510–519. doi:10.1016/j.solener.2018.05.027
7. Makrides, G., Zinsser, B., Georghiou, G.E., Schubert, M., Werner, J.H., 2009. Temperature behaviour of different photovoltaic systems installed in Cyprus and Germany. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 93, 1095–1099. doi:10.1016/j.solmat.2008.12.024
8. Marion, B., Kroposki, B., Emery, K., Cueto, J., Myers, D., Osterwald, C., 1999. Validation of a Photovoltaic Module Energy Ratings Procedure at NREL.
9. Osterwald, C.R., 1986. Translation of device performance measurements to reference conditions. *Sol. Cells*,18,3-4,Pages 269-279 80401, 269–279.
10. Osterwald, C.R., Glatfelter, T., Burdick, J., 1987. Comparison of the Temperature Coefficients of the Basic I-V parameters for Various Types of Solar Cells. *Devices, Energy Convers.* 188–193.
11. Paulescu, M., Badescu, V., Dughir, C., 2014. New procedure and field-tests to assess photovoltaic module performance. *Energy* 70, 49–57. doi:10.1016/j.energy.2014.03.085
12. Perraki, V., 2013. Temperature Dependence on the Photovoltaic Properties of Selected Thin-Film Modules. *Int. J. Renew. Sustain. Energy* 2, 140. doi:10.11648/j.ijrse.20130204.12
13. Şentürk, A., 2018a. New method for computing single diode model parameters of photovoltaic modules. *Renew. Energy* 128, 30–36. doi:10.1016/j.renene.2018.05.065
14. Şentürk, A., 2018b. Fotovoltaik modüllerin akım-gerilim eğrilerinin simülasyonunda kullanılacak olan yöntemin seçimi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.* 20, 1–14. doi:10.25092/baunfbed.411779
15. Şentürk, A., 2016. Yeni Bir Yöntem İle Kristal Silisyum Tabanlı Fotovoltaik Modüllerin Elektriksel Performansının Hesaplanması Ve Sıcaklık Katsayılarının (İç Ve Dış) Performansa Olan Etkisinin İncelenmesi. *Muğla Sıtkı Kocman University.*
16. Senturk, A., Eke, R., 2017. A new method to simulate photovoltaic performance of crystalline silicon photovoltaic modules based on datasheet values. *Renew. Energy* 103, 58–69. doi:10.1016/j.renene.2016.11.025

17. Şentürk, A., Eke, R., 2018. New method to compare indoor and outdoor temperature coefficients of photovoltaic modules. *Uludağ Univ. J. Fac. Eng.* 23, 127–138. doi:10.17482/uumfd.298338
18. Skoplaki, E., Palyvos, J. a., 2009. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Sol. Energy* 83, 614–624. doi:10.1016/j.solener.2008.10.008
19. Tsankov, P., 2015. Study Of The Temperature Coefficients Of Amorphous And Polycrystalline Silicon Photovoltaic Modules Under Real Operating Conditions. *Renew. energy sources* 2, 123–129. doi:10.7251/COMEN1502123T
20. van Dyk, E.E., Scott, B.J., Meyer, E.L., Leitch, A.W.R., 2000. Temperature Dependence Of Crystalline Silicon Photovoltaic Module. *South African J. Sci.* 96, April 2000 96, 198–200.