

T.C.
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YENİ BİR YÖNTEM İLE KRİSTAL SİLİSYUM
TABANLI FOTOVOLTAİK MODÜLLERİN
ELEKTRİKSEL PERFORMANSININ HESAPLANMASI
VE SICAKLIK KATSAYILARININ (İÇ VE DIŞ)
PERFORMANSA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

ALİ ŞENTÜRK

HAZİRAN 2016
MUĞLA

MUGLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEZ ONAYI

ALİ ŞENTÜRK tarafından hazırlanan **YENİ BİR YÖNTEM İLE KRİSTAL SİLİSYUM TABANLI FOTOVOLTAİK MODÜLLERİN ELEKTRİKSEL PERFORMANSININ HESAPLANMASI VE SICAKLIK KATSAYILARININ (İÇ VE DIŞ) PERFORMANSA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ** başlıklı tezinin, 03/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda doktora derecesi için gerekli şartları sağladığı oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

TEZ SINAV JÜRİSİ

Prof. Dr. Abdulmecit TÜRÜT (Jüri Başkanı)

İmza:

Fizik Müh. Anabilim Dalı, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul

Doç. Dr. Rüştü EKE (Danışman)

İmza:

Fizik Anabilim Dalı, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Prof. Dr. İdris AKYÖZ (Üye)

İmza:

Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir

Prof. Dr. İlhan TARIMER (Üye)

İmza:

Bilişim Sist. Müh. Anabilim Dalı, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Doç. Dr. Faruk ŞEN (Üye)

İmza:

Enerji Sist. Müh. Anabilim Dalı, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Prof. Dr. Abdulkadir Sertap KAVASOĞLU (Eş-danışman)

İmza:

Fizik Anabilim Dalı, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞI ONAYI

Prof. Dr. Arif NESRULLAZADE

İmza:

Fizik Ana Bilim Dalı Başkanı, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Doç. Dr. Rüştü EKE

İmza:

Danışman, Fizik Anabilim Dalı, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Savunma Tarihi: 03/06/2016

Tez çalışmalarım sırasında elde ettiğim ve sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgelerin tarafımdan bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde edildiğini; akademik ve bilimsel etik kurallarına uygun olduğunu beyan ederim. Ayrıca, akademik ve bilimsel etik kuralları gereği bu tez çalışması sırasında elde edilmemiş başkalarına ait tüm orijinal bilgi ve sonuçlara atıf yapıldığını da beyan ederim.

Ali ŞENTÜRK

03/06/2016



ÖZET

YENİ BİR YÖNTEM İLE KRİSTAL SİLİSYUM TABANLI FOTOVOLTAİK MODÜLLERİN ELEKTRİKSEL PERFORMANSININ HESAPLANMASI VE SICAKLIK KATSAYILARININ (İÇ VE DIŞ) PERFORMANSA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ali ŞENTÜRK

Doktora Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Rüştü EKE

Eş-Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Sertap KAVASOĞLU

Haziran 2016, 111 Sayfa

Bu çalışmada, kristal tabanlı silisyum modüllerin referans model parametrelerini hesaplamak için yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemle referans model parametrelerini hesaplamak için gerekli olan seri direnç başlangıç değeri, bu çalışmada türetilen yeni bir bağıntı kullanarak hesaplanmaktadır. Bu yeni bağıntının geçerliliği, 50 adet ticari olarak temin edilebilen kristal tabanlı silisyum modül için doğrulanmıştır. Ayrıca, dış ortamda gölgelendirme yöntemi kullanılarak dış sıcaklık katsayıları elde edilmiştir. Yeni yöntemin sahip olduğu simülasyon doğruluğu ile iç ve dış sıcaklık katsayılarının modül performansına olan etkileri, farklı çalışma koşullarında alttan temaslı tek kristal silisyum modül için elde edilen deneysel veriler kullanılarak incelenmiştir. Ölçülen ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılmasında ortalama karekök hata yaklaşımı kullanılmıştır. Yeni yöntem ile incelenen modülün I-V eğrisini ve elektriksel güç verimini %4,0 hata ile hesaplanmışken, farklı ısıtım profiline sahip olan günlerdeki maksimum çıkış gücünü %4,5 ve günlük enerji üretimini de %1,7 hata ile hesaplamak mümkün olmuştur. Bunun yanında, elde edilen sonuçlara göre, iç ve dış sıcaklık katsayıları modül performansının simülasyonunu aynı doğrulukta gerçekleştirebilmektedir.

Referans model parametrelerini hesaplamak için, iterasyon tekniklerine, ek bilgilere ve özel yazımlara gerek kalmaması, yeni yöntemin en önemli özellikleri olarak ortaya çıkmaktadır. Yeni yöntem sadece modül kataloglarında verilen bilgilerle, fotovoltaik tasarımcılara ve sıradan/son kullanıcılara, kristal tabanlı silisyum modüllerin gerçek zamanlı performansını kolayca hesaplayabilme imkanı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Modül, Tek Diyot Eşdeğer Devre Modeli, Simülasyon, Çıkış Gücü, Elektrik Enerjisi

ABSTRACT

A NEW METHOD FOR CALCULATING THE ELECTRICAL PERFORMANCE OF CRYSTALLINE SILICON BASED PHOTOVOLTAIC MODULES AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE COEFFICIENT (INDOOR AND OUTDOOR) EFFECT

Ali ŞENTÜRK

Doctor of Philosophy (PhD)

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Rüştü EKE

Co-Supervisor: Prof. Dr. Abdulkadir Sertap KAVASOĞLU

June 2016, 111 pages

In this work, a new method is presented to compute single diode model parameters at reference conditions for crystalline silicon based modules. This method employs new empirical relation, which is derived to obtain initial value of series resistance. Validity of the proposed relation has been tested through 50 commercially available crystalline silicon based photovoltaic modules. In addition, the outdoor temperature coefficients were calculated from shaded outdoor technique. Simulation accuracy of this method and the effect of indoor and outdoor temperature coefficients on the output performance were tested for different operating conditions, using experimental data from back contact mono crystalline silicon photovoltaic module. Relative root mean square error is used for analyzing simulation results. The new method simulates the I-V curve at different operating conditions; calculates the peak power output, the efficiency and the energy output values of back contact mono crystalline PV module at selected days with error of 4,0%, 4,5%, 4,0%, and 1,7% respectively. Obtained results show that the indoor and outdoor temperature coefficients simulate the output performance of crystalline-based silicon modules with same accuracy.

The new method calculates the single diode model parameters at reference conditions without using iterative techniques, additional information and special software. This method will enable photovoltaic designers and small-scale/end users to simulate the real time performance of crystalline silicon based photovoltaic modules using only datasheet values.

Keywords: Module, Single Diode Model, Simulation, Output power, Electricity
Yield



Eşim ve Oğluma,

ÖNSÖZ

Tez süresince sunduğum fikirlere destek olan danışmanım Doç. Dr. Rüştü Eke'ye,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi'nin bir parçası olmamı sağlayan eş-danışmanım
Prof. Dr. Abulkadir Sertap KAVASOĞLU'na,

Kapısını her çaldığımda bana vakit ayıran hocam Doç. Dr. Neşe Kavasoglu'na,

Birlikte çalışmaktan gurur duyduğum değerleri dostlarım Uzman Dr. Şadan Özden'e,
Uzman Özcan Birgi'ye, Arş. Gör. Yasemin Altınay'a, Arş. Gör. Duygu Akın Kara'ya
ve diğer iş arkadaşlarıma,

Kocaeli Teknik Lisesi Bilgisayar Bölümü ile Hacettepe Üniversitesi Fizik
Mühendisliği Bölümünün kıymetli hocalarına,

Sevgili eşim Burcu ve canım oğlum Yağız Ege başta olmak üzere bu günlere
gelmemi sağlayan Şentürk ve Yavuz Ailelerine, sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	7
2.1. Fotovoltaik Dönüşüm ve Karakteristik Parametreler.....	7
2.2. Fotovoltaik Modül.....	15
2.3. Sıcaklığın Elektriksel Performansa Etkisi ve Sıcaklık Katsayıları.....	18
2.4. Diğer İşletme Parametrelerinin Performansa Olan Etkisi.....	24
2.5. Fotovoltaik Modül Sıcaklığı.....	25
2.6. Fotovoltaik Modüle Ait Akım-Gerilim (I-V) Eğrilerinin Simülasyonu.....	26
3. MATERYAL.....	32
4. YÖNTEM.....	36
4.1. Dış Ortamda Sıcaklık Katsayılarının Elde Edilmesi.....	36
4.2. Akım-Gerilim (I-V) Eğrilerinin Simülasyonu.....	39
4.2.1. Referans model parametrelerinin hesaplanması.....	39
4.2.2. Güncel model parametrelerinin hesaplanması.....	44
4.2.3. Akım-gerilim (I-V) eğrisinin simülasyonu ve modül performansının hesaplanması.....	46
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	53
5.1. Dış Sıcaklık Katsayıları.....	53
5.2. Seri Direnç Başlangıç Değeri İçin Türetilen Yeni Bağıntının İrdelenmesi.....	55
5.3. İç ve Dış Sıcaklık Katsayılarının Modül Performansına Etkisi ve Model Performansını Hesaplamak İçin Yeni Yöntemin İrdelenmesi.....	58
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	81
KAYNAKLAR.....	84
EKLER.....	96
ÖZGEÇMİŞ.....	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yöntemlerin sınıflandırılması	4
Çizelge 3.1. Test modülünün katalog değerleri.....	33
Çizelge 4.1. Sıcaklık katsayılarını hesaplayabilmek için çizdirilmesi gereken grafiklerin eksen tanımları.....	37
Çizelge 4.2. Elektriksel parametreler ve değerleri	43
Çizelge 5.1. Hesaplanan dış sıcaklık katsayıları ve istatistiksel bilgiler	53
Çizelge 5.2. Ortalama sıcaklık katsayıları ve hata değerleri	53
Çizelge 5.3. İç ve dış sıcaklık katsayıları.....	54
Çizelge 5.4. R_{S0REF} değerlerinin hesaplanması.....	55
Çizelge 5.5. Yeni yöntem kullanılarak test modülü için hesaplanan referans şartlarındaki model parametreleri	57
Çizelge 5.6. I-V eğrilerinin simülasyonu için gerekli olan çalışma şartları.....	58
Çizelge 5.7. Seçilen günler ve bu günlere ait ısıtım profilleri.....	66
Çizelge 5.8. Ölçülen ve hesaplanan enerji çıktısı değerleri	69
Çizelge 5.9. KC200GT modülünün katalog değerleri (Ek G).....	74
Çizelge 5.10. Referans model parametrelerini hesaplamak için gerekli olan bilgiler (Jack vd., 2015) *	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Modellemenin temel basamaklarının temsili gösterimi	4
Şekil 2.1. Değerlik elektron sayıları 5 ve 3 olan Antimon (Sb) ve Bor (B) ile katkılama sonucu bir silisyum malzemede fazlalık elektron ve boşluk oluşumunun temsili gösterimi(http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu).....	8
Şekil 2.2. Bir p-n eklemde iç elektrik alan ve iç potansiyelin oluşması (http://www.daenotes.com/electronics/devices-circuits/formation-depletion-layer-diode)	9
Şekil 2.3. Aydınlıktaki ideal bir güneş gözesinin eşdeğer elektronik devresinin temsili gösterimi	12
Şekil 2.4. Bir güneş gözesinin aydınlık ve karanlıktaki akım-gerilim (I-V) eğrisi değişimi.....	12
Şekil 2.5. Özdeş güneş gözelerinin elektriksel olarak seri bağlanması	15
Şekil 2.6. Özdeş güneş gözelerinin elektriksel olarak paralel bağlanması	16
Şekil 2.7. Bir fotovoltaiik modülün üstten görüntüsü ve içerisinde elektriksel olarak seri bağlanmış 36 adet güneş gözesinin temsili şeması (http://www.uccs.edu/~rtirado/PES_1600_SolarEnergy/fotovoltaiic_effect.pdf).....	16
Şekil 2.8. Bir fotovoltaiik modülün yapısı (Eke, 2007)	17
Şekil 2.9. Fotovoltaiik hiyerarşi (Ma vd., 2014)	17
Şekil 2.10. Silisyumun yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişimi (O'Donnell ve Chen, 1991).....	19
Şekil 2.11. Sıcaklığın I-V ve P-V eğrilerine olan temsili etkisi	21
Şekil 2.12. İç ortam sıcaklık katsayılarını ölçmek için gerekli olan ölçüm sisteminin temsili gösterimi (http://www.pveducation.org)	23
Şekil 2.13. Işınmının I-V ve P-V eğrilerine olan temsili etkisi.....	25
Şekil 2.14. Temsili olarak akım-gerilim (I-V) eğrilerinin simülasyonu ve elektriksel parametrelerinin hesaplanması.....	27
Şekil 2.15. Belirli noktaların akım-gerilim eğrisi üzerindeki konumları.....	29
Şekil 2.16. Temsili olarak iterasyon yöntemi kullanılarak model parametrelerini hesaplanması (Villalva vd., 2009).....	30
Şekil 3.1. Test modülünün boyutları ve fiziksel görünümü	32
Şekil 3.2. Gerçek (a) ve temsili (b) gölgelendirme durumun gösterilmesi.....	35
Şekil 4.1. Dış ortamda gölgelendirme yöntemi ile modül sıcaklığı (T_M) ve I-V eğrilerinin ölçülmesi	36

Şekil 4.2. Sıcaklık katsayılarını hesaplayabilmek için çizdirilmesi gerekli grafikler (Çizelge 4.1.'e uygun olarak).....	38
Şekil 4.3. Test modülünün bulunduğu konum	38
Şekil 4.4. Basitleştirilmiş tek diyot elektronik eşdeğer devre modeli	39
Şekil 4.5. R_{S0REF} değerini hesaplamak için gerekli olan yeni bağıntının türetilmesi	42
Şekil 4.6. Yeni yöntem ile referans model parametrelerinin hesaplanması.....	44
Şekil 4.7. Güncel model parametrelerinin hesaplanması.....	46
Şekil 4.8. Newton-Raphson yöntemi ile I-V eğrisinin simülasyonu	47
Şekil 4.9. Ölçülen ve hesaplanan I-V eğrileri	48
Şekil 4.10. Gün boyunca ölçülen G ve T_M değerleri (09 Nisan 2015)	49
Şekil 4.11. Ölçülen ve hesaplanan maksimum çıkış gücü değerleri (09 Nisan 2015).....	50
Şekil 4.12. Ölçülen ve hesaplanan verimlilik değerleri (09 Nisan 2015)	50
Şekil 4.13. Farklı çalışma şartları ve sıcaklık katsayıları için I-V eğrilerinin simülasyonu ve karakteristik parametrelerin hesaplanması	51
Şekil 4.14. Temsili olarak P_M eğrilerinden enerji çıktısının hesaplanması.....	52
Şekil 5.1. Yeni bağıntı ve mevcut yöntem için elde edilen R_{S0REF} değerlerinin karşılaştırılması	56
Şekil 5.2. $G=111 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=8,2 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	59
Şekil 5.3. $G=208 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=13,3 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	59
Şekil 5.4. $G=314 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=20,3 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	60
Şekil 5.5. $G=402 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=28,5 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	60
Şekil 5.6. $G=518 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=35,5 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	61
Şekil 5.7. $G=605 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=40,0 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	61
Şekil 5.8. $G=714 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=45,3 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	62
Şekil 5.9. $G=815 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=49,9 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	62
Şekil 5.10. $G=909 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=54,5 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	63
Şekil 5.11. $G=999 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=52,9 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	63
Şekil 5.12. $G=1044 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=55,2 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri.....	64

Şekil 5.13. İç ve dış sıcaklık katsayıları kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilen I-V eğrileri için hesaplanan hata değerleri	64
Şekil 5.14. Ölçülen (P_{M_MEAS}) ve hesaplanan ($P_{M_İÇ}$ ve $P_{M_DIŞ}$) maksimum çıkış gücü değerleri (09 Şubat 2015).....	66
Şekil 5.15. Ölçülen (P_{M_MEAS}) ve hesaplanan ($P_{M_İÇ}$ ve $P_{M_DIŞ}$) maksimum çıkış gücü değerleri (17 Nisan 2015)	67
Şekil 5.16. Ölçülen (P_{M_MEAS}) ve hesaplanan ($P_{M_İÇ}$ ve $P_{M_DIŞ}$) maksimum çıkış gücü değerleri (29 Haziran 2015)	67
Şekil 5.17. Ölçülen (P_{M_MEAS}) ve hesaplanan ($P_{M_İÇ}$ ve $P_{M_DIŞ}$) maksimum çıkış gücü değerleri (19 Eylül 2015).....	68
Şekil 5.18. İç ve dış sıcaklık katsayıları kullanılarak elde edilen maksimum çıkış güçleri için hesaplanan hata değerleri.....	68
Şekil 5.19. İç ve dış sıcaklık katsayıları kullanılarak elde edilen enerji çıktısı değerleri için hesaplanan hata değerleri	70
Şekil 5.20. Ölçülen ve hesaplanan verimlilik değerleri (09 Şubat 2015)	70
Şekil 5.21. Ölçülen ve hesaplanan verimlilik değerleri (17 Nisan 2015).....	71
Şekil 5.22. Ölçülen ve hesaplanan verimlilik değerleri (29 Haziran 2015).....	71
Şekil 5.23. Ölçülen ve hesaplanan verimlilik değerleri (19 Eylül 2015).....	72
Şekil 5.24. İç ve dış sıcaklık katsayıları kullanılarak elde edilen verimlilik değerleri için hesaplanan hata değerleri	72
Şekil 5.25. KC200GT fotovoltaiik modülü için kataloglarda sunulan ve yeni yöntem kullanılarak elde edilen I-V eğrileri.....	74
Şekil 5.26. Yeni yöntemin farklı yöntemlerde karşılaştırılması (Lun vd., 2013).....	80

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AM;	Hava kütlesi çarpanı
V;	Volt
K;	Kelvin
°C;	Santigrad derece
STC;	Standart Test Koşulları veya referans şartları
A;	Amper
eV;	Elektron volt
ppm;	Part per million çarpanı (10^6)
G;	Işınım (W/m^2)
T;	Güneş gözesinin çalışma sıcaklığı (°C veya K)
T_M ;	Fotovoltaik modül sıcaklığı (°C veya K)
T_C ;	Çevre sıcaklığı (°C veya K)
η ;	Maksimum elektriksel dönüşüm verimi veya verim
TC;	Sıcaklık katsayısı (Temperature Coefficient)
G_{REF} ;	Referans ışınım değeri ($1000 W/m^2$)
T_{REF} ;	Referans modül sıcaklık değeri (25 °C)
α veya $\alpha_{iç}$;	Kısa-devre akımının sıcaklık katsayısı (ppm/°C)
β veya $\beta_{iç}$;	Açık devre geriliminin sıcaklık katsayısı (ppm/°C)
$\alpha_{DİŞ}$;	Dış ortam ölçümlerinden hesaplanan kısa-devre akımının sıcaklık katsayısı (ppm/°C)
$\beta_{DİŞ}$;	Dış ortam ölçümlerinden hesaplanan açık-devre geriliminin sıcaklık katsayısı (ppm/°C)
γ ;	Maksimum çıkış gücünün sıcaklık katsayısı (ppm/°C)
E_{VB} ;	Değerlik enerji bandının en yüksek enerji seviyesinin değeri (eV)
E_{IB} ;	İletkenlin enerji bandının en düşük enerji seviyesinin değeri (eV)
E_G ;	Yasak enerji aralığı (eV)
$E_G(0)$;	Mutlak sıcaklık değerindeki yasak enerji aralığı (eV)
$\vec{E}_{iç}$;	p-n eklemde meydana gelen iç elektrik alanı (Vm^{-1})
$V_{iç}$;	p-n eklemde meydana gelen iç potansiyel (Volt)
I_0 ;	Karanlıktaki ters doyma akımı (Amper)
q;	Elektronun yükü ($1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb)

k_B ;	Boltzmann sabiti ($1,38 \times 10^{-23}$ Joule/Kelvin)
h ;	Planck sabiti ($6,626 \times 10^{-34}$ Joulesaniye)
ν ;	Foton frekansı (Hertz)
c ;	Işık hızı (3×10^8 m/s)
n ;	Diyot faktörü
A ;	Düzeltilmiş diyot faktörü
A_M ;	Modül ün aktif yüzey alanı (m^2)
p_n ;	p tipi bölgedeki azınlık taşıyıcı olan elektron yoğunluğu (m^{-3})
n_p ;	n tipi bölgedeki azınlık taşıyıcı olan boşluk yoğunluğu (m^{-3})
ϑ_n ;	p tipi bölgedeki azınlık taşıyıcılarının difüzyon hızları (m/s)
ϑ_p ;	n tipi bölgedeki azınlık taşıyıcılarının difüzyon hızları (m/s)
L_n ;	p tipi bölgedeki azınlık taşıyıcılarının difüzyon uzunluğu (m)
L_p ;	n tipi bölgedeki azınlık taşıyıcılarının difüzyon uzunluğu (m)
τ_p ve τ_n ;	azınlık taşıyıcılarının yaşam süreleri (s)
Δn ve Δp ;	Fazlalık boşluk ve elektron yoğunlukları (m^{-3})
F ;	Birim alan başına düşen foton akısı (W/m^2)
α^l ;	Soğurma katsayısı (m^{-1})
Q ;	Kuantum verimliliğini
A^* ;	Soğurma sabiti
I_L ;	Işıkla oluşturulan veya fotovoltaiik akım (Amper)
I_{SC} ;	Kısa-devre akımı (Amper)
$I_{SC,P}$;	Güneş gözesi içerisinde oluşturulan ideal kısa devre akımı (Amper)
f_C ;	Güneş göze içerisinde oluşturulan akımın dış devreye sürülme oranı
V_{OC} ;	Açık-devre gerilimi (Volt)
I_M ;	Çıkış gücünün maksimum olduğu akım (Amper)
V_M ;	Çıkış gücünün maksimum olduğu gerilim (Volt)
P_M ;	Maksimum çıkış gücü (Watt)
P_{MREF} ;	Referans koşullarındaki maksimum çıkış gücü (W)
I_{MREF} ;	Referans koşullarındaki I_M akımı (Amper)
V_{MREF} ;	Referans koşullarındaki V_M gerilimi (Volt)
I_{SCREF} ;	Referans koşullarındaki I_{SC} akımı (Amper)
V_{OCREF} ;	Referans koşullarındaki V_{OC} gerilimi (Volt)
FF ;	Dolum çarpanı
N_S ;	Fotovoltaiik modül içerisinde eri bağlanan güneş gözesi sayısı

P_{IN} ;	Fotovoltaik modül üzerine gelen optiksel güç (W)
$A_{göze}$;	Güneş gözesinin yüzey alanı (m^2)
χ ;	Maksimum dönüştürme verimliliğinin sıcaklık katsayısı
κ ;	Maksimum dönüştürme verimliliğinin ışıınım katsayı
a ve b;	Varshni ifadesindeki regresyon sabitleri
ψ ;	Rekombinasyon mekanizmasını belirten parametre
X;	Yoğunlaştırıcı terimi
FP;	Fotovoltaik parametre
R_{SH} ;	Paralel (şönt) direnç (Ω)
R_S ;	Seri direnç (Ω)
R_{SHREF} ;	Referans şartlarındaki paralel (şönt) direnç (Ω)
R_{SREF} ;	Referans şartlarındaki seri direnç (Ω)
R_{S0} ;	Açık devre noktasındaki direnç değeri (Ω)
R_{SH0} ;	Kısa devre noktasındaki direnç değeri (Ω)
R_{SH0REF} ;	Referans şartlarındaki R_{SH0} değeri (Ω)
R_{S0REF} ;	Referans şartlarındaki R_{S0} değeri (Ω)
Δ ;	İterasyon artış adımı
ϵ ;	Kullanıcı tarafından belirlenen hata değeri
G_{MAX} ;	Fotovoltaik modül üzerine düşen maksimum ışıınım değeri (W/m^2)
G_{MIN} ;	Fotovoltaik modül üzerine düşen minimum ışıınım değeri (W/m^2)
G_{ORT} ;	Fotovoltaik modülüne düşen ortalama ışıınım değeri (W/m^2)
%G;	Fotovoltaik modül üzerine düşen ışıınım yüzde olarak değişimi
RMSE;	Bağıl ortalama karekök hata (%)
MAE;	Mutlak bağıl hata (%)
iç TC;	Laboratuar ortamında elde edilen sıcaklık katsayısı
dış TC;	Dış ortamda elde edilen sıcaklık katsayısı
RMSE _{iç} ;	İç sıcaklık katsayısı için hesaplanan RMSE değeri
RMSE _{dış} ;	Dış sıcaklık katsayısı için hesaplanan RMSE değeri
MAE _{iç} ;	İç sıcaklık katsayısı için hesaplanan MAE değeri
MAE _{dış} ;	Dış sıcaklık katsayısı için hesaplanan MAE değeri
$\eta_{iç}$;	İç sıcaklık katsayıları için hesaplanan verimlilik değeri
η_{MEAS} ;	Ölçülen I-V eğrilerinden hesaplanan verimlilik değeri
$\eta_{dış}$;	Dış sıcaklık katsayıları için hesaplanan verimlilik değeri
P_{M_MEAS} ;	Ölçülen I-V eğrilerinden hesaplanan P_M (W)
$P_{M_iç}$;	İç sıcaklık katsayıları için hesaplanan P_M (W)

$P_{M_DIŞ};$	Dışsıcaklık katsayıları için hesaplanan P_M (W)
$E;$	Modülün ürettiği elektrik enerjisi (enerji çıktısı) çıktısı (Wh)
$E_{MEAS};$	Ölçülen elektrik enerjisi veya enerji çıktısı (Wh)
$E_{İÇ}$ ve $E_{DIŞ};$	İç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanan enerji çıktısı (Wh)



1. GİRİŞ

Enerji, insanlığın gelişimini yüzlerce yıldan bu yana etkilemekte; bu bağlamda enerji tüketimi de mevcut kullanım ömürleri kısıtlı olan fosil yakıtların tükenme eğiliminde olmalarından dolayı son yılların en önemli meselesi olarak karşımıza çıkmaktadır (Sharma ve Chandel, 2013). İnsan nüfusunun hızla arttığı bu dönemde, enerji tüketimi oldukça yüksek bir boyuta ulaşmıştır (Cucchiella vd., 2015). Bunun yanında, enerjinin bir ihtiyaçtan öte, ticari bir kavram halini alması; kontrol edilebilme ve tahmini ile ilgili çalışmaları ortaya çıkarmıştır. Geliştirilen yöntemler ve modeller, enerji kaynaklarının tüketimi ile artan insan nüfusu arasındaki dengeyi sağlamayı amaçlamaktadır.

Artan enerji tüketimi ile birlikte fosil yakıt rezervlerinin azalması son yıllarda yenilenebilir enerjinin önemini ortaya çıkarmıştır. Güneş enerjisi ya da daha çok bilinen adı ile fotovoltaik enerji kavramı ilk olarak 1970'lerin başında petrol krizi ile gündelik hayata girmiştir. Fotovoltaik, foto kelimesine karşılık gelen ışık ve voltaik'e karşılık gelen gerilim kavramlarının bir araya getirilmesidir. Tanımlandığında, güneşten gelen enerjinin doğrudan olarak elektrik enerjisine dönüştürüldüğü aygıtlar (birimler) akla gelir. Güneş enerjisinin ve uygulamalarının sahip olduğu bazı avantajlar; kaynağın tükenmez olması, çevreye zarar vermemeleri, modüler yapıda olduklarından mevcut kurulu kapasitelerinin artırılabilir olması, diğer enerji üreten sistemlere göre basit çalışma teknolojilerine sahip olmaları, düşük bakım maliyetlerine sahip olmaları ve doğrudan ihtiyaç duyulan bölgeye kurulabilmeleri dolayısıyla enerji iletim hatlarına ihtiyaç duymamalarıdır (Navabi vd., 2015). Bunun yanında, süreksiz olmaları, depolama maliyetlerinin yüksek olması ve büyük miktarda enerji elde etme maliyetinin yüksek olması en bilinen dezavantajlarıdır. Bu nedenle, belirlenen bir coğrafi konumda kurulması planlanan fotovoltaik sistemin yatırım maliyetlerine bağlı olarak geri dönüşüm süresinin bilinmesi ekonomik uygulanabilirlik açısından oldukça önemlidir (Devabhaktuni vd., 2013).

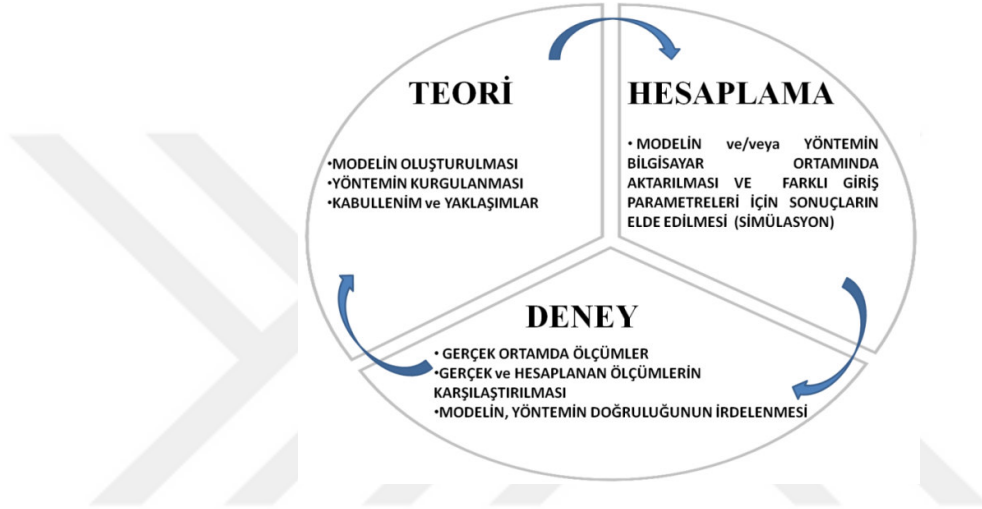
Fotovoltaik sürecin en önemli elemanı fotovoltaik güneş gözesi veya kısaca güneş gözesidir. Tipik olarak bir güneş gözesinin çıkış akımı birkaç amper (1-6 A) mertebelerinde iken, çıkış gerilimi ise yaklaşık olarak 0.5 V'tur. Bu durumda, güneş gözesinin çıkış gerilimi bilinen elektronik aygıtları çalıştırmak için yeterli değildir (Siddiqui vd., 2013). Bu yüzden, genellikle elektriksel olarak seri bağlanmış özdeş güneş gözeleri, uygun laminasyon (paket yapısı) tekniği kullanmak suretiyle fotovoltaik modül adı verilen ve dış ortam şartlarına dayanıklı yapıların içerisine yerleştirilmektedir. Satılabilme standartlarını sağlayan fotovoltaik modüllerin elektriksel sınıflandırma ölçütü, özel şartlarda ölçülen modülün maksimum çıkış gücüdür (P_M) (Wohlgemuth, 2012). Bunun amacı, aynı çalışma şartları için modül maksimum çıkış gücünün anlamlı olmasını sağlamaktır. Bu özel şartlar, referans şartları (STC: Standard Test Conditions) olarak adlandırılırlar ve ışıının 1000 W/m², spektral dağılımın AM1,5 ve modül sıcaklığının 25 °C olduğu durumları bildirir (Sharma vd., 2013). Günümüzde şebeke bağlantılı sistemlerin yaygınlaşması ile daha az sayıda modülün elektriksel olarak bağlanması ve böylece kayıpların azaltılması amacıyla yüksek güçlere sahip modüller ticari olarak üretilmekte ve piyasada 200 W değerini aşan modüller bulunabilmektedir. Daha yüksek kapasiteli çıkış güçleri elde edebilmek için, modüllerin farklı elektriksel konfigürasyonlarda bağlanması suretiyle meydana getirdikleri yeni yapıya fotovoltaik örgü denir. Bir fotovoltaik örgüye çeviriciler, güç ayarlama birimleri ve depolama birimleri eklendiğinde fotovoltaik sistem adını alır. Bu yüzden, sistemin ya da örgünün elektriksel performansını öngörebilmek için, modülün elektriksel performansı bilinmelidir.

Bir fotovoltaik modülün elektriksel performansı doğrudan, dönüştürme verimliliğine (η), üzerine düşen ışıınma (G) ve modül sıcaklığına (T_M) bağlıdır. Bunun yanında modülün elektriksel çalışma noktası, modül anatomisi ve çevre şartları elektriksel performansını belirleyen diğer parametrelerdir (Virtuani vd., 2015). Kullanıcılar ve/veya yatırımcılar için kurulumu yapılacak olan fotovoltaik sistemin/örgünün maliyet olarak geri dönüşüm süresinin bilinmesi oldukça önemlidir. Bir modülün veya sistemin ürettiği elektrik enerjisini ölçebilmek için, genellikle yüksek maliyete sahip olan özel ekipmanlara ve sensörlere ihtiyaç duyulur. Böylece, özellikle fotovoltaik örgüler ve sistemler dikkate alındığında, yüksek kurulum maliyetine ilaveten ölçüm ekipmanları eklenir (Kamarzaman ve Tan, 2014). Bunun yanında,

sahip oldukları yüksek maliyetlerine rağmen, bu tür ekipmanları her zaman temin etmek de mümkün değildir (Averbukh vd., 2012). Bu nedenle, fotovoltaiik göze, modül veya sistemlerin modellenmesi kaçınılmaz bir olgu olarak karşımıza çıkmaktadır. Fotovoltaiik sistem ya da fotovoltaiik sistemi oluşturan modül modellenerek, belirlenen bir zaman aralığı için gerçek çalışma şartları altındaki elektriksel performansı hesaplanır ve buna karşılık gelen ekonomik kazanç tahmin edilir (ön görülür). Böylece kurulum maliyeti bilinen bir fotovoltaiik örgü veya sistemin, kurulum yapılacak bölgede ne kadar süre sonra bu maliyeti karşılayacağı hakkında bir öngörü ortaya konulabilir.

Modelleme; fiziksel bir sistemin (olayın veya problemin) model parametreleri, belirli kabuller ve yaklaşımlar kullanılarak matematiksel olarak ifade edilmesi/tanımlanmasıdır. Seçilen model, farklı durumlar veya çalışma şartları için sistemin gerçek davranışına cevap verebilmelidir. Modeli tanımlayan parametrelerin veya değişkenlerin hesaplanma süreci ise yöntem olarak adlandırılır. Kullanılacak yöntemin seçimi bazı parametrelere bağlıdır (hesaplama doğruluğu, hesaplama basitliği, güvenilirlik, vb.). Yöntem içerisindeki karmaşık olan ve uzun süren hesaplama süreçlerini ortadan kaldırmak için bilgisayarlı hesaplama (computing) adımı uygulanır. Bu adımda, modelleme ve/veya yöntem bilgisayar ortamına aktarılır. Farklı çalışma şartlarına karşılık gelen model parametreleri değiştirilerek modellenen fiziksel sistemin çıktıları/sonuçları hesaplanır. Bu sürece ise simülasyon adı verilir. Kullanılan modelin, yöntemin ve yaklaşımların doğruluğuna, deney adı verilen son bölümde karar verilir. Gerçek ortamda elde edilen sonuçlar (ölçülen) ile simülasyon (hesaplanan) sonuçları karşılaştırılır. Ölçülen ve hesaplanan sonuçlar arasındaki fark, belirlenen bir hata aralığının içinde kalıyorsa önerilen model, yöntem ve yaklaşımlar incelenen fiziksel olayı ya da problemi tanımlamak ya da bir başka ifade ile modellemek için yeterli olur. Aksi takdirde, teori denen başlangıç adımı geri dönülerek, var olan model, yöntem veya yaklaşımlar gözden geçirilir. Deney ve hesaplama adımları kendi arasında yer değiştirebilmektedir (Şekil 1.1.). Deney ve teori adımları arasındaki ilişkiyi destekleyen en önemli ve hızlı süreç simülasyondur. İyi bir modelleme ve doğruluğu test edilmiş bir yöntem ile ifade edilebilen fiziksel problemler, simülasyon tekniği kullanılarak incelendiğinde, ekipman maliyetleri uzun ölçüm ve analiz süreleri gibi sorunlar ortadan kaldırılmış olur (Jung ve Ahmed, 2012).

Bir fotovoltaik modülün çalışması tek veya çift diyot eşdeğer devre yaklaşımları ile modellenebilir. Bu iki model arasındaki en belirgin fark, sundukları doğruluk ve hesaplama kolaylığıdır. Seçilen modele göre, modeli tanımlayan parametrelerin bilinmesi gereklidir. Model parametrelerini hesaplamak için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Yöntemler, farklı gruplar tarafından farklı başlıklar altında sınıflandırılmış ve karşılaştırılmıştır (Çizelge 1.1.).



Şekil 1.1. Modellemenin temel basamaklarının temsili gösterimi

Çizelge 1.1. Yöntemlerin sınıflandırılması

Yazar	Sınıflandırma	Karşılaştırma
(Jena ve Ramana, 2015)	İterasyon olmayan, iterasyon, analitik ve dinamik	İterasyon zorluğu, simülasyon doğruluğu, karmaşıklık derecesi ve hesaplama hızı.
(Tossa vd., 2014)	Grafiksel, analitik ve nümerik	Hayır
(Batzelis ve Papathanassiou, 2015)	Nümerik, eğri uydurma/optimizasyon ve analitik	Hayır
(Tamrakar ve Gupta, 2015)	Analitik, iterasyon ve evrimsel	Hayır
(Jack vd., 2015)	Analitik ve eğri uydurma/optimizasyon	Ek bilgiler, iterasyon gereksinimi ve kullanıcı tahminli başlangıç değerleri.

Model parametrelerini hesaplayabilmek için rapor edilen yöntemler Jack ve arkadaşları tarafından; analitik ve eğri uydurma/optimizasyon olmak üzere iki grupta incelemiş ve yöntemleri uygulayabilmek için gerekli olan bilgiler ve hesaplamalar açısından sınıflandırmıştır (Jack vd., 2015). Bir diğer çalışmada yöntemler; iterasyon, iterasyon olmayan ve dinamik olarak sınıflandırılmış; iterasyon derecesi, karmaşıklık (uygulama kolaylığı), doğruluk ve hesaplama hızı kriterlerine göre karşılaştırılmıştır (Jena ve Ramana, 2015).

Karmaşık hesaplar ve uygulama zorluğu içeren yöntemler, araştırmacılar açısından sorun olmamasına rağmen, son kullanıcılar (end-user) ya da fotovoltaik tasarımcılar tarafından pek tercih edilmezler. Bunun nedeni, rapor edilen birçok yöntemi uygulayabilmek için belirli seviyede bilgi birikimine, özel yazımlara ve belirli başlangıç değerlerine ihtiyaç duyulmasıdır (Cubas vd., 2014a; Ding vd., 2014; Jack vd., 2015; Massi Pavan vd., 2014). Bu yüzden seçilen yöntem, sahip olduğu doğruluğun yanında, basit ve uygulanabilir de olmalıdır. Sonuç olarak, fotovoltaik modül piyasasının büyüdüğü ve son kullanıcılar için bile ulaşılır hale geldiği günümüzde, modül parametrelerini ve dolayısıyla fotovoltaik performansı hesaplayabilmek için yeni yöntemlerin gerekliliği kaçınılmazdır.

Modül performansının simülasyonunda veya hesaplanmasında daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi için, yönteme ait olan giriş parametrelerinin doğru olması gerekmektedir (Fanney vd., 2006; Tian vd., 2012). Mevcut çalışmalarda, fotovoltaik modüllerin güncel performansını hesaplayabilmek için kullanılan en önemli giriş parametrelerinden biri sıcaklık katsayısıdır (TC). Sıcaklık katsayıları, değişen modül sıcaklığının, modülün elektriksel parametrelerine olan etkisini matematiksel olarak ifade eden bir kavramdır. Bu yüzden, sıcaklık katsayılarının doğru bir şekilde bilinmesi/hesaplanması ortaya konan yöntemin doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Modül kataloglarında, iç ortamda 1000 W/m^2 sabit ışınlam ve spektral dağılımı ifade eden hava kütlesi değerinin 1,5 (air mass; AM1,5) olduğu durumda ölçülen α , kısa-devre akımı ve β , açık devre gerilimi sıcaklık katsayıları belirtilir. İlaveten bazı modül üreticileri γ , maksimum çıkış gücü sıcaklık katsayısını da kullanıcılara sunmaktadır. Bazı çalışmalarda iç ortamda kontrollü şartlar altında elde edilen sıcaklık katsayılarının, dış ortamdaki değişken koşullar altında modüllerin elektriksel performansını yansıtmadığı ya da yansıtamayacağı ifade edilmiştir (Dash

vd., 2015; Durisch vd., 1996; Perraki ve Kounavis, 2016). Dış ortamda belirli kısıtlamalara uymak suretiyle elde edilen sıcaklık katsayıları, dış sıcaklık katsayıları olarak adlandırılır (Siddiqui vd., 2014). Sıcaklık katsayıları ile ilgili mevcut çalışmaların tamamına yakını, iç ve dış sıcaklık katsayılarını doğrudan birbirleriyle karşılaştırmak suretiyle değerlendirmişlerdir (Fanney vd., 2006; Granata vd., 2011; Makrides vd., 2009). Yapılan literatür taramasında iç ve dış sıcaklık katsayılarının, dış ortamdaki modülün elektriksel performansına olan etkileri ve bu etkileri dikkate alarak değerlendirilmeleri ile ilgili bir çalışmanın olmadığı belirlenmiştir.

Bu çalışmanın iki temel amacı bulunmaktadır; fotovoltaik tasarımcılar ve son kullanıcıların (evsel ihtiyaçlar ve elektrik şebekesinden uzak noktadaki küçük güç talep eden kullanıcılar) kolaylıkla uygulayabileceği yeni bir yöntem ortaya koymak ve iç ve dış sıcaklık katsayılarının modül performansına olan etkisini incelemektir. Bu çalışmada, dış ortamda gölgelendirme yöntemi kullanılarak alttan temaslı tek kristal silisyum fotovoltaik modülün dış sıcaklık katsayıları hesaplanmıştır. Elde edilen dış sıcaklık katsayıları ile modül üreticilerinin sunduğu iç sıcaklık katsayılarının modülün elektriksel performansına (I-V eğrisine, maksimum çıkış gücüne, maksimum dönüştürme verimliliğine ve elektrik enerjisine) olan etkisi incelenmiştir. Fotovoltaik modül, tek diyot eşdeğer devre yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Model parametreleri ise, mevcut çalışmalarda bildirilen yöntemlerden farklı olarak bu tez çalışmasında ilk defa öne sürülen yeni bir yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Ortaya konan bu yeni yöntemde, model parametrelerini hesaplayabilmek için sadece modül kataloglarında yer alan elektriksel parametrelerin ve sıcaklık katsayılarının bilinmesi yeterlidir. Ölçülen değerler, yeni yöntem kullanılarak, iç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu doktora tezinin 1. bölümünde çalışmanın amacı hakkında genel bir giriş yapılmış, 2. bölümünde gerekli olan teorik bilgiler anlatılmış; 3. bölümünde çalışmada kullanılan test modülü ve ölçüm sistemi tanıtılmış; 4. bölümünde tezde kullanılan yeni yöntem hakkında bilgi verilmiş; 5. bölümünde elde edilen ölçüm sonuçları ayrıntılı bir şekilde tartışılmış ve son bölümde de elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. TEORİK BİLGİLER

Bu bölümde fotovoltaik dönüşüm, karakteristik parametreler, fotovoltaik modüllerin çalışması, sıcaklık katsayılarının elde edilmesi ile ilgili temel bilgiler özetlenmiştir. Son kısımda ise bir fotovoltaik modüle ait akım-gerilim (I-V) eğrisinin simülasyonunu gerçekleştirebilmek için kullanılan mevcut yöntemler incelenmiş ve anlatılmıştır.

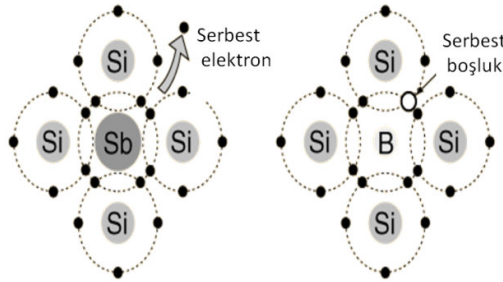
2.1. Fotovoltaik Dönüşüm ve Karakteristik Parametreler

Fotovoltaik dönüşümün temel yapı taşı güneş gözesidir. Bir güneş gözesi, optiksel ve elektriksel özellikleri ile fotovoltaik dönüşüme uygun olarak seçilen yarıiletken malzemelerden oluşturulmuş bir p-n eklemdir.

Güneş gözesi üretiminde en çok kullanılan yarıiletken malzeme IV. grup elementi olan silisyumdur (Si). Bir silisyum atomunun son yörüngesinde 4 adet elektron bulunur. Bu elektronlara değerlik ya da valans elektronları adı verilir. Değerlik elektronları, değerlik enerji bandını oluştururlar. Bu bandın en yüksek enerji seviyesi, E_{VB} ile ifade edilir. Değerlik elektronlarının bulunabileceği olası bir üst enerji bandı; iletkenlik bandı olarak adlandırılır ve bu bandın en alt enerji düzeyi, E_{IB} ile ifade edilir. Bu iki enerji bandı arasında, serbest taşıyıcıların bulunamayacağı yasak enerji aralığı, E_G , bulunur.

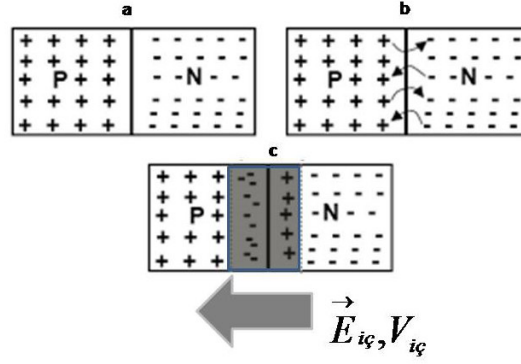
Yarıiletken malzemeler uygun katkılama işlemi ile farklı elektriksel özelliklere kavuştururlar. Saf bir silisyum yarıiletken malzeme, V. grup elementlerinden olan antimon (Sb) ile katkılanabilir. Bu durumda 5 değerlik elektrona sahip olan katkı atomu çevresinde 4 değerlik elektronuna sahip olan Si atomları ile kovalent bağ oluşturur. Katkı atomunun 5. değerlik elektronu kristal yapı içerisinde zayıf bağ yapmasından dolayı, düşük ısı uyarmalarda bile izinli olan iletkenlik bandına geçebilir. Sonuç olarak, katkılanan Si malzeme sahip olduğu fazlalık serbest elektrondan dolayı "n tipi" yarı iletken malzeme olarak adlandırılır. Bu tip yarıiletkenlerde elektronlar çoğunluk, boşluklar ise azınlık taşıyıcılar olarak adlandırılırlar. Benzer şekilde, katkılama işleminde III. grup elementlerinden olan

bor (B) kullanılabilir. Bu durumda, katkı atomunun 3 değerlik elektronu komşu Si atomları ile kovalent bağ oluşturur. Bor atomunun eksik değerlik elektronundan dolayı, başka bir Si atomundan bir elektron alınır. Böylece, kristal yapı içerisinde fazlalık bir boşluk yaratılmış olur. Bu tip yarı iletkenlere "p tipi" yarı iletkenler denir. Bu tip yarıiletkenlerde boşluklar çoğunluk, elektronlar ise azınlık taşıyıcılar olarak adlandırılırlar. Katkılama sonucunda fazlalık elektron ve boşluk oluşumu Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Değerlik elektron sayıları 5 ve 3 olan Antimon (Sb) ve Bor (B) ile katkılama sonucu bir silisyum malzemede fazlalık elektron ve boşluk oluşumunun temsili gösterimi(<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>)

Temel olarak, bir güneş gözesi, farklı katkılanmış iki adet yarıiletkenin metalürjik kontak yapılarak meydana getirilen bir p-n eklemidir. Aynı tür yarıiletken malzemeden oluşan yapıya homoecklem, farklı tür yarıiletken malzemelerden oluşan yapıya ise heteroecklem denir. Birbirleriyle olan ilk temas anından itibaren (n-tipi ve p-tipi malzemelerde, Şekil 2.2.a) denge durumuna (Şekil 2.2.c) kadar bir geçiş süreci meydana gelir. Bu süreç şu şekilde gelişir. Temas (kontak) sınırında, p-tipindeki çoğunluk taşıyıcılar olan boşluklar ve n-tipindeki çoğunluk taşıyıcılar olan elektronlar yoğunluk farkından dolayı meydana gelen difüzyon hareketi ile karşı bölgelere geçerler (difüzyon, Şekil 2.2b). Bu difüzyon hareketinden dolayı, kontak sınırındaki p-tipi ve n-tipi bölgelerde hareketsiz olan eksi ve artı yüklü iyon merkezleri ortaya çıkar (Şekil 2.2c'deki gri bölge). Bunun sonucu olarak, n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru bir iç elektrik alan, $\vec{E}_{iç}$ ve buna karşılık gelen iç potansiyel, $V_{iç}$ oluşur (Şekil 2.2.c). Bu iç elektrik alan, $\vec{E}_{iç}$ yoğunluk farkından dolayı meydana gelen difüzyon hareketini ve dolayısıyla her iki bölgedeki çoğunluk taşıyıcılarının karşı bölgelere geçişini engeller.



Şekil 2.2. Bir p-n eklemden iç elektrik alan ve iç potansiyelin oluşması

(<http://www.daenotes.com/electronics/devices-circuits/formation-depletion-layer-diode>)

Denge durumunda, çoğunluk taşıyıcıların hareketinden dolayı meydana gelen difüzyon akımı ile azınlık taşıyıcıların (p-tipi bölgesindeki elektronlar ve n-tipi bölgesindeki boşluklar) oluşturduğu sürüklenme akımları eşit olduğundan, eklemden geçen net akım sıfırdır. Temas sınırının komşuluğunda, serbest yük taşıyıcılarının bulunmadığı bölgeye, tüketilmiş ya da boşaltılmış bölge (space charge region, depletion region, Şekil 2.2c;koyu bölge) olarak ifade edilir. Bunun dışında kalan bölgeler, yaklaşık nötral bölge olarak adlandırılır (Tozlu, 2004).

Karanlıktaki bir p-n eklemin, p-tipi bölgesine pozitif, n-tipi bölgesine ise negatif gerilim uygulandığında (ileri besleme), çoğunluk taşıyıcıların karşı bölgeye geçmelerini engelleyen iç alanın şiddeti azalır ve toplam akım aşağıda verildiği gibi ifade edilir (Shockley, 1949).

$$I_{\text{ileri}} = I_0 (e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1) \quad (2.1)$$

Ters besleme durumunda ise, iç alanda bir artış meydana gelir. Böylece difüzyon akımını belirleyen çoğunluk taşıyıcıların hareketi iyice azalır. Bu durumda sadece, azınlık taşıyıcıların belirlediği sürüklenme akımı baskın olur ve ters doyma akımı adı verilen negatif bir değerde kalır. Ters doyma akımı (I_0), p ve n tipi bölgelerde termal (ısısal) uyarımlar ile oluşturulan elektron-boşluk çiftleri oranına bağlıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$I_0 = p_n q \vartheta_p + n_p q \vartheta_n \quad (2.2)$$

Burada n_p ve p_n n ve p tarafındaki azınlık yük taşıyıcı yoğunlukları $\mathcal{V}_p$ ve $\mathcal{V}_n$ ise azınlık taşıyıcılarının difüzyon uzunluğu (L_n, L_p) ile yaşam süreleri (τ_p, τ_n) cinsinden ifade edilebilen hızlarıdır. Bu durumda ters doyma akım aşağıdaki ifade ile verilir.

$$I_0 = q(p_n \frac{L_p}{\tau_p} + n_p \frac{L_n}{\tau_n}) \quad (2.3)$$

Bir p-n eklem aydınlatıldığında, çoğunluk yük taşıyıcılarındaki artış oldukça az olur. Ancak, azınlık yük taşıyıcısı yoğunluğu önemli miktarda artarak ters doyma akımının değişmesine neden olur.

$$I_0(\text{ışık}) = q \left[(p + \Delta p) \frac{L_p}{\tau_p} + (n + \Delta n) \frac{L_n}{\tau_n} \right] = I_0 + I_L \quad (2.4)$$

Burada I_L ; ışık ile oluşan yük taşıyıcılarının meydana getirdiği veya kısaca fotovoltaiik akımı, Δn ve Δp ise denge durumunda (oluşma ve yeniden birleşme hızlarının eşit olduğu) fotonun soğurulması sonucu birim hacim ve birim zamanda oluşan ekstra boşluk ve elektron yoğunluklarını ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilirler

$$\Delta p = \frac{FQ\alpha' \tau_p}{h\nu} \quad (2.4)$$

$$\Delta n = \frac{FQ\alpha' \tau_n}{h\nu} \quad (2.5)$$

Burada F; birim alan başına düşen ışınlımı, α' ; soğurma katsayısını, Q; malzemenin kuantum verimliliğini tanımlamaktadır. Bu durumda I_L akımı eşitlik (2.6)'da belirtildiği gibi yazılabilir.

$$I_L = \frac{Q\alpha' Fq}{h\nu} (L_n + L_p) \quad (2.6)$$

Bir güneş gözesi üzerine gelen fotonun enerjisi ($h\nu$), göze içerisindeki p-n eklemi oluşturan malzemelerin yasak enerji aralığından (E_G) eşit ya da büyük olduğu durumda, gelen foton serbest elektron-boşluk çifti meydana getirebilir. Yasak enerji aralığından küçük enerjili fotonlar ($h\nu < E_G$) elektron-boşluk çifti

oluşturamayacaklarından, fotovoltaiik dönüşüme katkıda bulunamazlar. Gelen foton tarafından iletkenlik bandına çıkartılan elektronlar, burada saniyenin milyonda biri mertebesinde (μs) bir süre kalıp, değerlik bandına geri dönme eğilimindedirler. Elektronların iletkenlik bandında kaldıkları süre "yaşam süresi" (lifetime) olarak adlandırılır. Bu yaşam süresi içerisinde, iletim bandına çıkmış elektronlar bir etkinin yardımı ile boşluklarla birleşmeleri engellenemezse, fotovoltaiik dönüşüme bir katkıda bulunamazlar. Güneş gözelerinde, oluşturulan elektron-boşluk çiftlerinin birbirlerinden ayrılarak, akım oluşumunu sağlayacak etki tüketilmiş bölge boyunca oluşan $\vec{E}$ 'dir. Bu alanın etkisi ile birbirlerinden ayrılan elektron ve boşluklar, bir dış devre üzerinden birleştirildiğinde, dış devre elemanlarından akan elektriksel yükler, doğrudan güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin kaynağıdır. Oluşturulan serbest taşıyıcılar olan elektronlar ve boşluklar, dış devreyi tamamlayamadan güneş gözesi içerisinde yeniden birleşirlerse fotovoltaiik dönüşüme katkıda bulamazlar. Bu duruma rekombinasyon (yeniden birleşme) adı verilir (Eke, 2007; Kavasoglu, 2000).

Bir güneş gözesinin fotovoltaiik dönüşümü gerçekleştirebilmesi için öncelikle elektron-boşluk çiftini oluşturacak olan ışınının soğurulması gerekmektedir. Uyarılmış bir elektronun değerlik bandından doğrudan iletim bandına geçişi temel soğurma olarak adlandırılır. Bu süreçte, enerji ve momentum korunur. Bu tür geçişler doğrudan geçiş olarak adlandırılır. Foton tarafından uyarılan elektron, E_1 enerji seviyesinden daha yüksek olan E_2 enerji seviyesine geçer. Enerjisi $h\nu$ olan fotonun soğurma katsayısı $\alpha^1(h\nu)$ olarak ifade edilir ve E_1 enerji seviyesindeki elektron yoğunluğu ile E_2 enerji seviyesindeki uygun durumların yoğunluğu ile orantılıdır. Doğrudan geçişli yarıiletkenin soğurma katsayısı $\alpha^1(h\nu)$ aşağıdaki gibi ifade edilir.

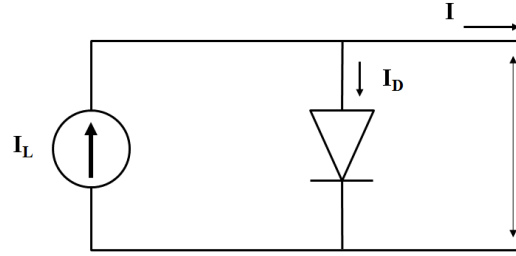
$$\alpha^1(h\nu) \approx A^* (h\nu - E_G)^{1/2} \quad (2.7)$$

Burada A^* bir sabit ve E_G yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığıdır.

Dolaylı geçişli yarıiletkenlerde ise değerlik bandının en üst enerji seviyesi (E_{VB}) ile iletim bandının en alt enerji seviyesi (E_{IB}) aynı kristal momentumuna karşılık gelmezler. Bu durumda, foton soğurulması esnasında enerji ile birlikte momentumun da korunması için enerjisi düşük fakat yüksek momentuma sahip bir fonon gereklidir. Dolaylı geçişli yarıiletkenlerin soğurma katsayısı, iletim bandındaki elektronların geçişi için sadece uygun seviyelere değil, aynı zamanda soğurulan ve

yayılan fononların uygun momentumlarına da bağlıdır. Bu nedenle, bu tip yarıiletken malzemelerin sahip oldukları soğurma katsayısı, doğrudan geçişli malzemelerin sahip olduğu soğurma katsayısına göre daha düşüktür (Eke, 2007).

Aydınlık altındaki ideal bir güneş gözesinin eşdeğer elektronik devresi; p-n eklemi temsil eden bir diyot ile ışıkla üretilen akımı temsil eden bir akım kaynağından meydana gelir (Şekil 2.3.).

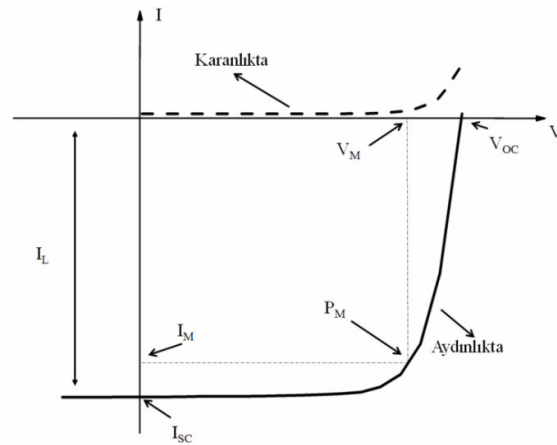


Şekil 2.3. Aydınlightaki ideal bir güneş gözesinin eşdeğer elektronik devresinin temsili gösterimi

İdeal bir gözenin çıkış akımı (I); diyot akımı (I_D) ile fotovoltajik akım (I_L) arasındaki farka eşittir ve aşağıdaki ifade ile tanımlanır.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nk_B T}} - 1 \right) - I_L \quad (2.8)$$

Bir güneş gözesinin karanlıktaki ve aydınlıktaki akım-gerilim eğrileri eşitlik (2.1) ve eşitlik (2.8)'e uygun olarak Şekil 2.4.'te gösterilmiştir (Eke, 2007).



Şekil 2.4. Bir güneş gözesinin aydınlık ve karanlıktaki akım-gerilim (I-V) eğrisi değişimi

Aydınlık durumda bir güneş gözesinin çıkış akımı (I) eksi değerdedir. Bu yüzden, eşitlik (2.8)'in sağ tarafı eksi (-) ile çarpılarak I değerlerinin pozitif olması sağlanmıştır, eşitlik (2.9).

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV}{nk_B T}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

Aydınlıktaki bir güneş gözesinin, belirli bir ışınlım (G) ve sıcaklık (T) değerlerindeki I-V eğrisinden elde edilebilecek karakteristik elektriksel parametreler aşağıda tanımlanmış olup I-V eğrisi üzerindeki konumları Şekil 2.4.'te gösterilmiştir (Kavasoglu, 2000).

Kısa devre akımı, I_{SC} : Gerilim uygulamaksızın (göze uçlarına bağlanan yük direnci değerinin 0Ω olduğu durum) güneş gözesinden çekilen akım; kısa devre akımı olarak tanımlanır. Kısa devre akımı; gelen ışığın spektrumuna, gözenin kuantum verimliliğine (gelen foton başına oluşturulan elektron-boşluk çifti sayısı), gözenin soğurma katsayısına, göze içerisindeki iç alanın şiddetine, yaratılan yük taşıyıcılarının yaşam sürelerine ve mobilitelerine bağlıdır. Bu çalışma noktasında, güneş gözesinin çıkış gerilimi sıfır olduğundan ($P = IV = I_{SC}0 = 0$) güneş gözesinin çıkış gücü de sıfırdır.

Açık devre gerilimi, V_{OC} : Güneş gözesinin uçları açık devre iken (göze uçlarına bağlanan yük direnci değerinin $\infty \Omega$ olduğu durum) gözenin çıkış gerilim değeri; açık devre gerilimi olarak tanımlanır. Bu çalışma noktasında, güneş gözesinin çıkış akımı sıfır olduğundan ($P = IV = 0V_{OC} = 0$) güneş gözesinin çıkış gücü de sıfırdır. Genellikle kısa devre akımı ve ters doyma akımı cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_{OC} = \frac{nk_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.10)$$

Açık devre gerilimi, kısa devre akımına olan logaritmik bağlılığından dolayı, yüksek ışınlım değerlerinde sabit bir değer alır.

Maksimum çıkış akımı, I_M : Güneş gözesinin çıkış gücünün en yüksek olduğu durumdaki akım değeridir.

Maksimum çıkış gerilimi, V_M : Güneş gözesinin çıkış gücünün en yüksek olduğu durumdaki gerilim değeridir.

Maksimum çıkış gücü, P_M : Güneş gözesinin çıkış gücünün en yüksek olduğu değerdir ($P_M = I_M V_M$).

Dolum çarpanı, FF : Güneş gözesinin belirli bir G ve T değerinde sahip olduğu I - V eğrisinin ne kadar "dikdörtgen" olduğunun ölçüsüdür ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$FF = \frac{I_M V_M}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.11)$$

Maksimum dönüştürme verimliliği, η : Bir güneş gözesinin sahip olduğu maksimum çıkış gücünün (P_M), güneş gözesine gelen fotonların optiksel gücüne (P_{IN}) olan oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{P_M}{P_{IN}} = \frac{V_M I_M}{P_{IN}} \quad (2.12)$$

Burada P_{IN} , güneş gözesi üzerine gelen optiksel gücü tanımlar ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{IN} = A_{göze} \int_0^{\infty} F(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda \quad (2.13)$$

Burada $A_{göze}$; güneş gözesinin yüzey alanını, $F(\lambda)$; λ dalga boyunda birim alana birim zamanda gelen toplam foton sayısını ve hc/λ her bir fotonun enerjisini ifade etmektedir (Kavasoğlu, 2000).

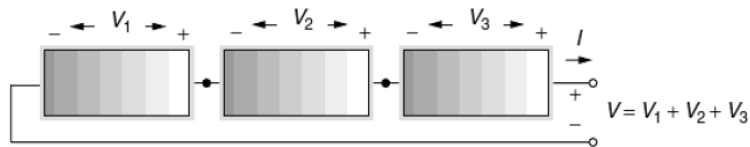
Genellikle bir güneş gözesinin veya fotovoltaiik modülün maksimum dönüştürme verimliliği (η), ışıınıma (G) ve sıcaklığa (T) olan bağımlılığı aşağıdaki verilen bağıntı ile ifade edilir (Kaplani ve Kaplanis, 2014; Skoplaki ve Palyvos, 2009a).

$$\eta = \eta_{REF} \left(1 - \chi(T - 25) + \kappa \ln \left(\frac{G}{1000} \right) \right) \quad (2.14)$$

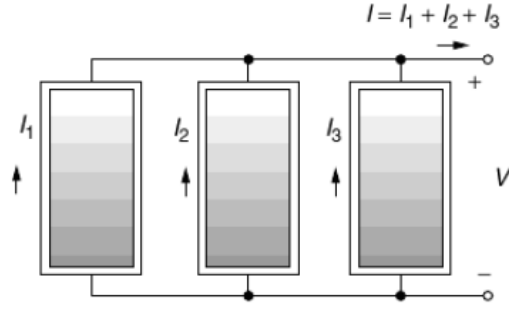
Burada, η_{STC} , χ ve κ , referans şartlarındaki verimliliğini, verimlilik için sıcaklık katsayısını ve güneş gözesinin türü tarafından belirlenen bir sabiti ifade etmektedir. Bu bağıntıya göre, düşük ışıyım değerleri için, logaritmik terim daha baskın olurken, ışıyımın artması ile beraber, logaritmik terimin sabit bir değere gitmesinden dolayı sıcaklık terimi daha baskın hale gelmektedir.

2.2. Fotovoltaik Modül

Tipik olarak bir güneş gözesinin çıkış akımı birkaç amper (1-6 A) mertebelerinde iken, çıkış gerilimi ise yaklaşık olarak 0,5 Volttur. Güneş gözesinin çıkış gerilimi bilinen elektronik aygıtları çalıştırmak için yeterli değildir (Siddiqui vd., 2013). Yüksek çıkış gerilimi, özdeş olduğu kabul edilen güneş gözelerinin elektriksel olarak seri bağlanması ile elde edilir. Bu durumda oluşturulan yeni yapının çıkış akımı, tek bir güneş gözesinin sahip olduğu çıkış akımına eşitken, çıkış gerilimi ise seri bağlanmış güneş gözelerinin sahip olduğu çıkış gerilimlerinin toplamına eşittir (Şekil 2.5.). Benzer olarak yüksek çıkış akımı, özdeş olduğu kabul edilen güneş gözelerinin elektriksel olarak paralel bağlanması ile elde edilir. Bu durumda oluşturulan yeni yapının çıkış gerilimi, tek bir güneş gözesinin sahip olduğu çıkış gerilimine eşitken, çıkış akımı ise paralel olarak bağlanmış güneş gözelerinin sahip olduğu çıkış akımlarının toplamına eşittir (Şekil 2.6.). Aynı anda çıkış gerilimini ve çıkış akımını yükseltmek için, özdeş oldukları kabul edilen güneş gözeleri elektriksel olarak seri ve paralel şekilde birbirleriyle bağlanırlar. Oluşan yeni yapının çıkış akımı ve çıkış gerilimi, paralel olarak bağlanmış güneş gözelerinin sahip oldukları çıkış akımlarının ve seri olarak bağlanmış güneş gözelerinin sahip oldukları çıkış gerilimlerinin toplamına eşit olur.

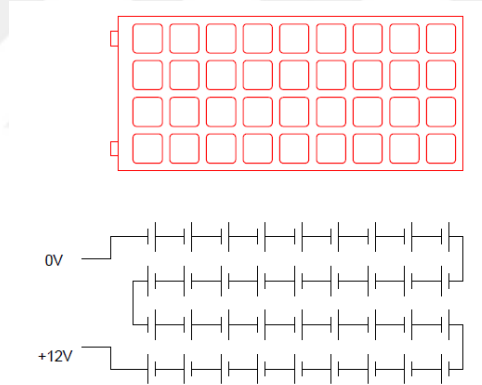


Şekil 2.5. Özdeş güneş gözelerinin elektriksel olarak seri bağlanması



Şekil 2.6. Özdeş güneş gözelerinin elektriksel olarak paralel bağlanması

Ticari olarak temin edilebilen modüller incelendiğinde güneş gözelerinin çoğunlukla 32'li, 36'li veya 72'li gruplar halinde seri bir şekilde bağlandığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise, depolama birimi olan akülerin genellikle 12 Volt veya katları şekline olmasıdır (Şekil 2.7.).

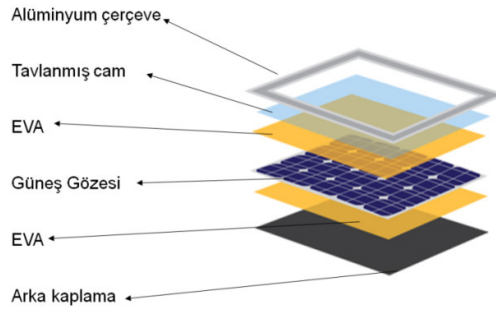


Şekil 2.7. Bir fotovoltaik modülün üstten görüntüsü ve içerisinde elektriksel olarak seri bağlanmış 36 adet güneş gözelerinin temsili şeması

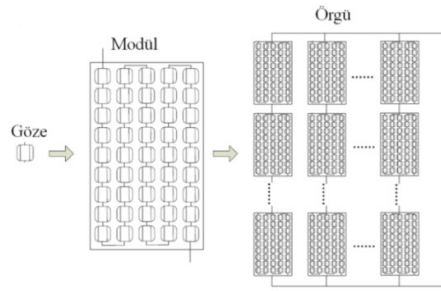
(http://www.uccs.edu/~rtirado/PES_1600_SolarEnergy/fotovoltaic_effect.pdf)

Güneş gözeleri kırılkan yapıda olduklarından dış ortam şartlarına dayanıklı değildirler. Genellikle elektriksel olarak seri bağlanan güneş gözeleri, dış ortam şartlarına dayanıklı hale getirilmelidirler. Bu nedenle dış ortam şartlarına mukavemetli modül denilen yapıların içerisinde yerleştirilirler (Ma vd., 2014). Fotovoltaik bir modül, güneş gözelerinin dış ortam şartlarından korumanın yanında, gözeler üzerine gelen ışınmı soğurmayı sağlayan bir cam kaplama, modül ön ve arka yüzeyi arasındaki ısıl gerilmeyi en aza indiren, modülün çatı, duvar ve benzeri yüzeylere montajını ve nakliyesini kolaylaştıran, genellikle alüminyum profillerle

desteklenen bir yapıdan ibarettir. Bunun yanında, yansımadan dolayı meydana gelen ışınlam kayıplarını mümkün olduğunca en aza indirmek için modül içerisindeki güneş gözelerinin üst yüzeyi yansımayı önleyici bir tabaka (ARC: antireflectingcoating) ile kaplanmaktadır. Tipik olarak bir fotovoltaik modül, Şekil 2.8.'de gösterildiği gibi, modülün ön yüzeyinde çevresel şartlara dayanıklı ve optiksel geçirgenliği yüksek olan düşük demir yoğunluklu tavllanmış camdan (low iron tempered glass), modül içerisindeki gözeyi ön ve arkadan kaplayan ve güneş ışınlamalarından etkilenmeyen EVA (ethilin vinil asetat)'dan, güneş gözesinden ve arka yüzeyin yalıtımını sağlayan plastik bir tabakadan meydana gelmektedir (Sadok ve Mehdaoui, 2008; Sharma ve Chandel, 2013). Kurulumu yapılacak fotovoltaik örgü veya sistemin boyutlandırılması (kurulu gücü), fotovoltaik modüllerin referans (STC) şartlarında sahip oldukları maksimum çıkış gücü değerlerine göre gerçekleştirilir.



Şekil 2.8. Bir fotovoltaik modülün yapısı (Eke, 2007)



Şekil 2.9. Fotovoltaik hiyerarşi (Ma vd., 2014)

Birden fazla modülün seri/paralel konfigürasyonlar halinde elektriksel olarak bağlanması ile meydana gelen yeni yapıya örgü adı verilir (Şekil 2.9.). Fotovoltaik

örgüye, enerji çeviricileri, iletim hatları ve depolama gibi birimler eklendiğinde meydana gelen yeni yapı ise fotovoltaik sistem olarak adlandırılır.

2.3. Sıcaklığın Elektriksel Performansa Etkisi ve Sıcaklık Katsayıları

Bir fotovoltaik modül üzerine düşen ışınmı, onu oluşturan ve özdeş oldukları kabul edilen güneş gözelerinin sahip oldukları verimlilik oranı kadarıyla doğrudan olarak elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Geriye kalan ve fotovoltaik dönüşüme katılmayan kısmı ise ısı olarak fotovoltaik modül içerisine aktarılacak, modül sıcaklığının artmasına ve modülün elektriksel performansının değişmesinenden olmaktadır. Bir güneş gözesinin dolayısı ile bir modülün elektriksel özelliklerinin sıcaklık bağımlılığını anlayabilmek için, gözelerin ürettikleri yarıiletken malzemelerin sahip olduğu sıcaklık bağımlılıkları incelenmelidir.

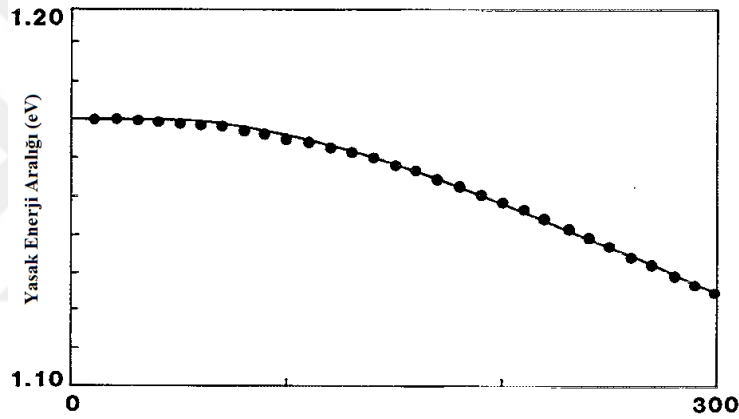
Artan modül sıcaklığı fotovoltaik dönüşümde meydana gelen kayıp süreçlerinin artmasına neden olmaktadır. Fotovoltaik süreçte temel olarak iki tür kayıp mekanizması baskındır; spektral uyumsuzluk ve soğurma-yayınım dengesi (absorption-emission balance). Spektral uyumsuzluk kayıplarının nedeni, göze üzerine düşen geniş spektruma sahip ışınm ile güneş gözesinin yasak enerji aralığından dolayı sahip olduğu kısıtlı soğurma özelliğidir. Bu durumda kayıp süreci iki farklı şekilde gerçekleşir. İlk olarak, güneş gözesi üzerine gelen yüksek enerjili fotonlar ($h\nu > E_G$), sahip oldukları fazlalık enerjiyi ($h\nu - E_G$) oluşturulan elektronlar-boşluk çiftlerinin vasıtası ile örgü atomlarına ısı olarak aktarmaktadır (termalizasyon). İkinci olarak ise; yasak enerji aralığının altındaki enerjilere sahip fotonlar ($h\nu < E_G$) hiç bir elektron-boşluk çifti oluşturmadan göze içerisinden geçmektedir.

Soğurma-yayınım dengesi kayıplarında ya da kısaca denge kayıplarında en önemli süreç rekombinasyondur. Rekombinasyon sürecinin iki temel etkisi vardır; (1) oluşturulan taşıyıcı çiftlerin dış akıma katkı verememesini ifade eden akım kayıpları ve (2) güneş gözesi içerisinde, taşıyıcı çiftlerinin oluşturulma-rekombinasyon dengesinin değişmesi sonucu iç potansiyelindeki (V_{IC}) azalmadan dolayı meydana gelen gerilim kayıplarıdır.

Fotovoltaik dönüşümde meydana gelen tüm temel kayıplar yasak enerji aralığının (E_G) bir fonksiyonudur. Bir yarıiletkenin yasak enerji aralığının sıcaklıkla olan değişimi ampirik bir ifade olan Varshni ifadesi ile aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Varshni, 1967).

$$E_G = E_G(0) - \frac{aT}{T^2 + b} \quad (2.15)$$

Burada $E_G(0)$, yarıiletkenin mutlak sıfır sıcaklığında sahip olduğu yasak enerji aralığı, a ve b ise yarıiletken malzemeye göre farklılık gösteren regresyon sabitleridir (Şekil2.10.).



Şekil 2.10. Silisyumun yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişimi (O'Donnell ve Chen, 1991)

Bu ifadeye göre, sıcaklığın artması yasak enerji aralığını azaltmaktadır. Bunun nedeni, elektron-fonon etkileşmesi ve örgünün gösterdiği ısısal genleşmeden dolayı enerji bantlarında meydana gelen değişikliklerdir. Birkaç istisna malzeme hariç, çoğu yarıiletkenin, yasak enerji aralığı sıcaklık ile çizgisel bir şekilde azalmaktadır (Dupré vd., 2015; Green, 2003).

Mevcut güneş gözelerinin sahip oldukları sıcaklık bağımlılığının %80-90'ı açık devre gerilimlerinin sahip olduğu sıcaklık bağımlılığından kaynaklanmaktadır. Fotovoltaik süreç açısından, göze içerisinde elektron-boşluk çiftlerinin oluşturulma hızının (generation rate), rekombinasyon hızına eşit olduğu durum, açık devre gerilimi olarak adlandırılır. Bu durumda, dış devreden bir akım akmaz. Bu yüzden açık devre geriliminin sıcaklık bağımlılığı, oluşturulma ve rekombinasyon dengesinin sıcaklık bağımlılığının bir göstergesidir. Oluşturulma hızı; ışınımın sahip olduğu spektral

dağılıma, ışıınım şiddetine ve yansıma gibi parametrelerin birer fonksiyonudur. Rekombinasyon hızı ise; farklı birleşme mekanizmalarına bağlıdır (doğrudan, dolaylı, Auger vb.) (Dupré vd., 2015; Green, 2003).

Açık devre geriliminin sıcaklık katsayısı (β) aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Dupré vd., 2015; Singh and Ravindra, 2012).

$$\beta = \frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{-\frac{E_G(0)}{q} - V_{oc} + \Psi \frac{kT}{q}}{T} \quad (2.16)$$

Burada Ψ göze içerisinde baskın olan rekombinasyon mekanizması tarafından belirlenen bir parametredir.

Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı, sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Azalan yasak enerji aralığı, oluşturulan elektron-boşluk çifti sayısının ve dolayısıyla güneş gözesinin kısa devre akımının artmasına neden olur. Kısa devre akımı, ideal kısa devre akımı ($I_{SC,P}$), akımın toplanma oranı (f_c) ve yoğunlaştırıcı (X) terimleri cinsinden aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır (Dupré vd., 2015; Green, 2003).

$$I_{SC} = I_{SC,P} f_c X \quad (2.17)$$

Üretilen ideal kısa devre akımı ($I_{SC,P}$); q elektronun yükü olmak üzere modül üzerine gelen foton akısı yoğunluğu (F ; photon flux density), gözenin sahip olduğu yasak enerji aralığı ve sıcaklığı ile doğrudan orantılı olup aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

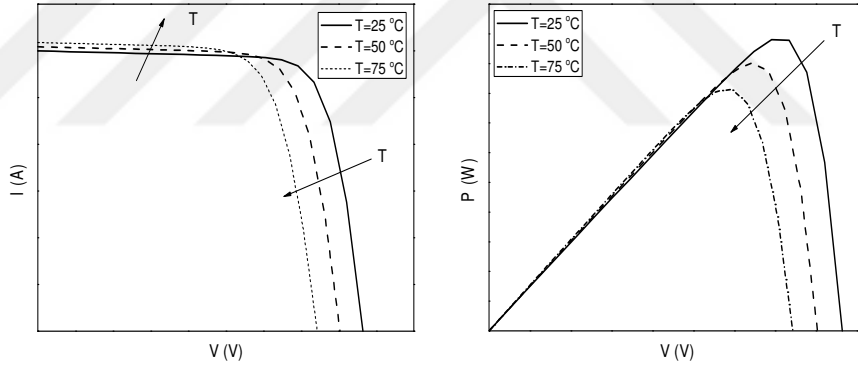
$$I_{SC,P} = q \int_{E_G(T)}^{\infty} F(E) dE \quad (2.18)$$

Yoğunlaştırıcı teriminin sıcaklıktan bağımsız ve toplanma oranı teriminin de sadece yansıma ve geçirgenliğin fonksiyonu olduğu durum için, kısa devre akımı sıcaklık katsayısının (α) en genel hali aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Dupré vd., 2015; Singh and Ravindra, 2012).

$$\alpha = \frac{1}{I_{SC}} \frac{dI_{SC}}{dT} = \frac{1}{I_{SC,P}} \frac{dI_{SC,P}}{dE_G} \frac{dE_G}{dT} + \frac{1}{f_c} \frac{df_c}{dT} \quad (2.19)$$

Kısa devre akımının sıcaklık katsayısının yasak enerji aralığına yakın olan dalga boylarında gelen ışının spektral şiddetine bağlı olduğu eşitlik (2.18) ve eşitlik (2.19)'dan görülmektedir.

Yukarıda anlatılanların ışığında, artan modül sıcaklığı ile beraber I_{SC} 'da az da olsa bir artış gözlenir. Bunun yanında, artan modül sıcaklığı V_{OC} 'nde bir azalmaya neden olur. V_{OC} 'ndeki azalış I_{SC} 'ndaki artıştan daha baskın olduğundan dolayı, modül sıcaklığın çıkış gücüne olan etkisi negatif olarak ortaya çıkar. Bir başka ifade ile artan modül sıcaklığı çıkış gücünü azaltacaktır. Artan modül sıcaklığının akım-gerilim (I-V) ve güç gerilim (P-V) eğrilerine olan etkisi temsili olarak Şekil 2.11.'de gösterilmiştir. I-V eğrisinin akım (I) eksenini kestiği noktalar kısa devre akımına, gerilim (V) eksenini kestiği noktalar ise açık devre gerilimine karşılık gelmektedir. Okların yönü ise, artan sıcaklığının eğriler üzerindeki etkisini ifade etmektedir.



Şekil 2.11. Sıcaklığın I-V ve P-V eğrilerine olan temsili etkisi

Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısını β ve kısa devre akımı sıcaklık katsayısını α hesaplayabilmek için karmaşık ifadeler olan denklem (2.16) ve denklem (2.19)'a ihtiyaç duyulur. Buna rağmen mevcut çalışmalarda, belirli bir çalışma sıcaklığı aralığında (0°C ile 50°C) bu sıcaklık katsayılarının sabit değerler aldıkları bildirilmiştir (Dupré vd., 2015; Osterwald vd., 1987; Singh ve Ravindra, 2012). Bir başka ifade ile I_{SC} ve V_{OC} 'nin modül sıcaklığı ile olan değişimleri doğrusaldır. Bu durumda bu iki parametrenin ışınım ve sıcaklığa olan bağımlılıkları eşitlik (2.20) ve (2.21) ile ifade edilir (Lun vd., 2013; Orioli ve Di Gangi, 2013; Tossa vd., 2014).

$$I_{SC}(G,T) = I_{SCREF} \frac{G}{G_{REF}} (1 + \alpha(T - T_{REF})) \quad (2.20)$$

$$V_{OC}(G,T) = V_{OCREF} \left(1 + \beta(T - T_{REF}) + \frac{N_s n k_B T}{V_{OCREF} q} \ln \left(\frac{G}{G_{REF}} \right) \right) \quad (2.21)$$

Burada bilinenlerin dışında n ; modül içerisindeki gözenin diyot faktörü ve N_s ; modül içerisinde seri bağlanan göze sayısıdır.

Belirli çalışma sıcaklığı aralıklarında sabit olan bir sıcaklık katsayısı (*Temperature Coefficient: TC*) aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Osterwald vd., 1987).

$$TC = \frac{\Delta FP}{\Delta T} \quad (2.22)$$

Burada TC; sıcaklık katsayısı, ΔT ; modül sıcaklık farkı, FP; ΔT 'lik modül sıcaklık farkına karşılık gelen karakteristik parametredeki değişimdir (Emery vd., 1996). Genellikle, modül katalogları vasıtası ile kullanıcılara sunulan sıcaklık katsayıları mutlak ($A/^{\circ}C$, $V/^{\circ}C$) veya bağıl ($1/^{\circ}C$) birim olarak verilmektedir. Bağıl sıcaklık katsayısı; mutlak sıcaklık katsayısının (eşitlik (2.22)), ilgili performans parametresinin Standard Test Koşullarındaki değerine (FP_{STC}) bölünmesi ile hesaplanmaktadır, eşitlik (2.23).

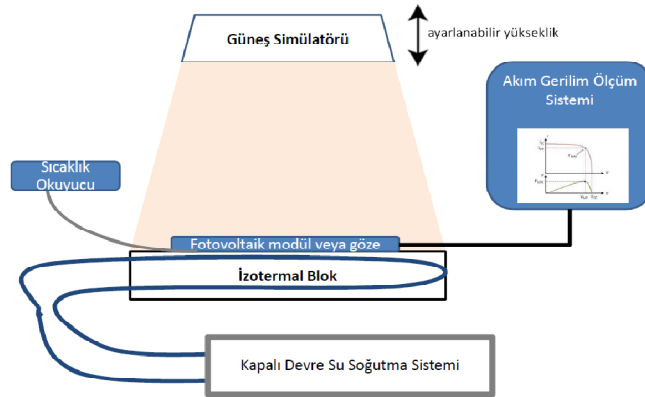
$$TC = \frac{1}{FP_{STC}} \frac{\Delta FP}{\Delta T} \quad (2.23)$$

Bağıl sıcaklık katsayıları; farklı güçteki ve tipteki fotovoltaik modüllerin karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. Küsurlu sayılardan kurtulmak için, bağıl sıcaklık katsayıları 10^6 ile çarpılarak, "ppm" (partpermillion) birimine dönüştürülmektedir (Osterwald vd., 1987).

Mevcut rapor edilmiş yöntemlerde, bir fotovoltaik modülün I-V eğrisini, maksimum çıkış gücünü (P_M) ve seçilen zaman aralığı (gün, ay, yıl) boyunca ürettiği elektrik enerjisini (E) gibi parametreleri hesaplamak için α ve β sıcaklık katsayılarının bilinmesi yeterlidir. Bunun yanı sıra, bazı yöntemler, modül performansını hesaplayabilmek için ilaveten maksimum çıkış gücü sıcaklık katsayısı olan γ 'ya ihtiyaç duymaktadır (Bellia vd., 2014; Rus-Casas vd., 2014; Villalva vd., 2009).

Ancak, ticari olarak temin edilebilen modüllerin katalogları incelendiğinde β ve α değerlerinin tüm kataloglarda yer aldığı ancak γ değerinin her zaman yer almadığı tespit edilmiştir.

İç ortamda sıcaklık katsayılarının elde edebilmek için gerekli olan farklı sıcaklık değerleri, uygun soğutma/ısıtma sistemleri ile sağlanmaktadır. Bunun yanında, modül performansını doğrudan etkileyen ışıınım (G) ve spektral dağılım (AM) parametreleri güneş simülatörleri kullanılarak elde edilmektedir. İç ortam ölçümlerinde modül sıcaklığı dışındaki tüm parametreler sabit bir değerde tutulmaktadır. İç ortamdaki sıcaklık katsayıları, genellikle ışıının 1000 W/m² ve spektral dağılımın AM1,5 olduğu durumda gerçekleştirilen ölçümlerden hesaplanmaktadır. Kullanılan güneş simülatörü, aydınlattığı güneş gözesinin ya da modülün ısınmasına, böylece sıcaklığının artmasına neden olabilmektedir. Bu yüzden, incelenen güneş gözesi veya modülün alt kısmına kapalı devre soğutma sistemi yerleştirilerek, sıcaklık artışının kontrollü olması sağlanmaktadır (King vd., 1997). İç ortam ölçümlerinde kullanılan ölçüm sisteminin temsili Şekil 2.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. İç ortam sıcaklık katsayılarını ölçmek için gerekli olan ölçüm sisteminin temsili gösterimi (<http://www.pveducation.org>)

Dış ortamdaki sıcaklık katsayılarının ölçüm süreci, iç ortamdakinden oldukça farklıdır. İç ortam ölçümlerinde, ışıınım, spektrum dağılımı, modül veya göze çalışma sıcaklığı gibi parametreleri kontrol etmek mümkündür. Oysa bu parametreler dış ortamda zamanla değişkenlik göstermektedir. Bundan başka iç ortam ölçümlerinde

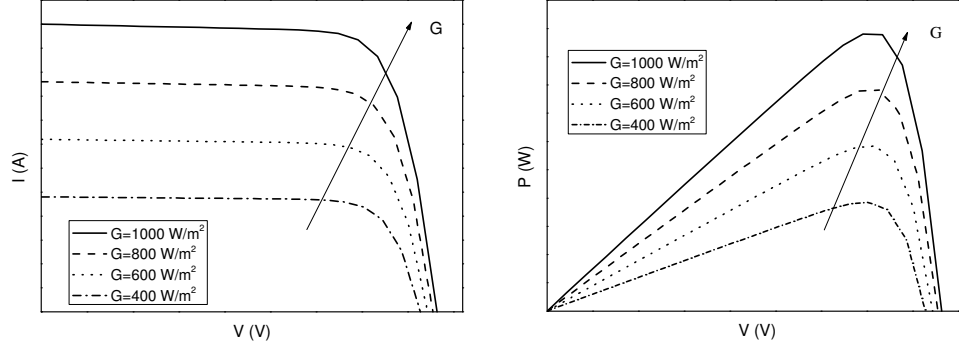
bulunmayan rüzgârın etkisi, dış ortam ölçümlerinin tekrarlanabilirliğini azaltan en önemli etkidir (Schwingshackl vd., 2013). Bu nedenle, dış ortamdaki sıcaklık katsayılarının ölçümünde tekrarlanabilirliği arttırabilmek için belirli kısıtlamalara uyulması gerekmektedir. Bu kısıtlamalar; spektral dağılımın etkisini en aza indirmek için, ışıınım değerinin 800 W/m^2 'den yüksek olduğu açık günler, rüzgâr hızının 2 m/s den düşük olduğu, ölçüm süresince ışıınım değişiminin $\%2$ 'den az olduğu ve modül çalışma sıcaklığının okuma hassasiyetinin $\pm 2^\circ \text{C}$ derece olduğu durumlardır (Fanney vd., 2006).

Dış ortam ölçümlerinde, elektriksel parametreleri modül sıcaklığına bağlı olarak ölçebilmek için, genellikle artan bir sıcaklık farkı kullanılmaktadır. Bundan başka azalan sıcaklık farkı yöntemini de kullanmak mümkündür (van Dyk vd., 2000). Artan sıcaklık farkı yönteminde; modülü gölgelemek suretiyle modül sıcaklığının (T_M) çevre sıcaklığına (T_C) yakın bir değere inmesi ve daha sonradan gölgelendirmenin ortadan kaldırılarak modülün ısınması ile sağlanır (Emery vd., 1996). Azalan sıcaklık farkı yönteminde ise; özel fırınlarda çalışma sıcaklığının üstündeki sıcaklıklara ısıtılan modülün, daha sonrasında dış ortamda soğumaya bırakılması ile elde edilmektedir (van Dyk vd., 2000). Bunun yanında, gölgelendirmenin sebep olacağı ani ışıınım değişimlerinden dolayı, özellikle amorf silisyum tabanlı modüllerde, gölgelendirme yöntemini kullanılmak yerine, uygun soğutma sistemleri ile modülün sıcaklığının düşürülmesi gerektiği rapor edilmiştir (Muñoz-García vd., 2012).

Dış ortamdaki sıcaklık katsayısı ölçümleri ayrıntılı olarak Bölüm 4.1'de anlatılmıştır.

2.4. Diğer İşletme Parametrelerinin Performansa olan Etkisi

Çalışma sıcaklığının sabit kaldığı durumda, göze üzerine gelen ışıının artması oluşturulacak olan elektron-boşluk çifti sayısının artmasına ve bunun sonucunda da kısa devre akımında bir artışa neden olmaktadır. Bir önceki bölümde belirtildiği üzere, açık devre geriliminin, kısa devre akımına ve dolayısıyla ışıınımına olan bağıllığı logaritmiktir, eşitlik (2.10). Bu durumda, artan ışıınımdan dolayı açık devre geriliminde az da olsa bir artış meydana gelmektedir. Artan ışıının I-V ve P-V eğrilerine olan etkisi temsili olarak Şekil 2.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Işınnın I-V ve P-V eğrilerine olan temsili etkisi

Işınım ve modül sıcaklığının yanında, modül performansını etkileyen bir diğer parametre modül üzerine düşen ışınının sahip olduğu spektral dağılımdır. Güneşten gelen ışınının atmosferden geçmesine göre spektral dağılımın değişimini ifade eden parametre hava kütlesidir (AM: airmass). Atmosfer dışında güneşten gelen ışınım miktarı sabit olarak kabul edilir ve 1365 W/m^2 değerindedir. Atmosfer güneş spektrumunu soğurmalarla etkiler ve farklı dalga boyları için ışınım değerlerinde azalmalar olur. Atmosferden geçtikten sonra yatay yüzey için ışınımın maksimum değeri yaklaşık 1000 W/m^2 olmaktadır. Güneş spektrumu ve ışınım değerleri uygulamada hava kütlesi ölçeklendirmesi ile verilir. Buna göre AM0 uzayda, atmosfer dışındaki güneş spektrumuna karşılık gelirken, AM1 güneşin tam tepede olduğu durumda yer yüzeyindeki spektruma karşılık gelir. Pratik olarak genelde yeryüzüne yaklaşık 48° lik bir yüzeydeki güneş spektrumu olan AM1,5 değeri kullanılır (Özden, 2015).

Güneş ışınının spektral dağılımındaki değişimlerin, fotovoltaik modüllerin performansına olan etkisi, fotovoltaik modüllerin yapıldığı yarıiletken malzemenin sahip olduğu yasak enerji bant aralığından ileri gelmektedir. Bu değişimler doğrudan olarak fotovoltaik akımının büyüklüğünü etkilemektedir (Eke, 2007).

2.5. Fotovoltaik Modül Sıcaklığı

Bir fotovoltaik modül üzerine düşen ışınının (G), sahip olduğu verimlilik değeri (η) kadarını elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Işınının fotovoltaik dönüşüme

katılmayan kısmı, modül yapısı içerisinde ısı enerjisi şeklinde aktararak, modül sıcaklığının (T_M) artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden, üzerine ışıyım gelen bir modülün sıcaklığı çevre sıcaklığından genellikle (T_C) yüksektir. Bunun yanında, modülün sahip olduğu anatomi, modül içerisindeki güneş gözesinin üretim teknolojisi, modülün montaj türü ve çevresel koşullar modül sıcaklığını belirleyen diğer faktörlerdir (Kaplani ve Kaplanis, 2014).

Bir modülün elektriksel performansının sıcaklık ile olan değişimini ifade eden sıcaklık katsayılarını hesaplayabilmek için modül içerisindeki güneş gözesinin sıcaklığı (T) bilinmelidir. Ancak modülün kapalı (encapsulation) yapısı gereği, içerisinde yer alan güneş gözesinin sıcaklığını ölçmek mümkün değildir (Kandil vd., 2011). Bu yüzden mevcut çalışmalarda göze sıcaklığı, modül arka yüzey sıcaklığı olarak kabul edilmekte ve modülün arka yüzeyine sıcaklık sensörü yapıştırılması suretiyle ölçülmektedir ($T \approx T_M$) (Fannee vd., 2006; Jakhrani vd., 2011; Kaldellis vd., 2014; Krauter ve Preiss, 2009). Modül içerisindeki göze sıcaklığı ile modül arka yüzey sıcaklığı arasındaki fark, modül anatomisine, modülün montaj biçimine ve çevresel etkenlere bağlı olarak, en fazla $\pm 3^\circ\text{C}$ mertebelerindedir (Trinuruk vd., 2009). Modül sıcaklığındaki $\pm 5^\circ\text{C}$ 'lık bir okuma hatasının, modül çıkış gücünde %3'lük bir hataya sebep olduğu bildirilmiştir (King, 1996). Bunun yanında, ön ve arka yüzey sıcaklıklarının ölçülerek, bu iki değer ortalamasını modül sıcaklığı olarak da kabul etmek mümkündür (Huang vd., 2011). Modül yüzeyindeki sıcaklık dağılımını incelemek için, modül içerisindeki farklı gözeler üzerine 6 adet sıcaklık sensörü yerleştirmiştir ve bu noktalar arasında belirgin bir sıcaklık farkı olmadığı rapor edilmiştir (Mattei vd., 2006).

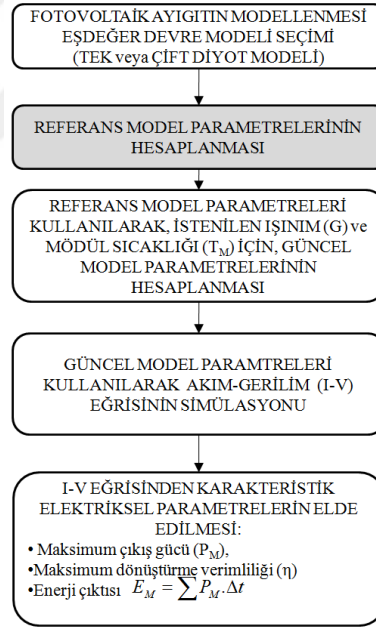
Bir modülün çalışma sıcaklığı, doğrudan ölçülebildiği gibi çevre koşullarına bağlı olarak teorik ya da ampirik ifadeler içeren farklı ısı modelleriyle de hesaplamak mümkündür (Skoplaki ve Palyvos, 2009b).

2.6. Fotovoltaik Modüle Ait Akım-Gerilim (I-V) Eğrilerinin Simülasyonu

Bir fotovoltaik modüle ait; P_M , V_{OC} , I_{SC} veya η gibi temel elektriksel parametreleri elde edebilmek için, belirli bir ışıyım (G) ve modül sıcaklığı (T_M) değerlerindeki

akım-gerilim (I-V) eğrisinin bilinmesi gereklidir. Modülün I-V eğrisini ölçebilmek için özel olarak tasarlanan ölçü aletlerine ihtiyaç duyulur. Sahip oldukları yüksek maliyetlerin yanında, çoğu zaman bu özel ekipmanları temin etmek mümkün değildir (Averbukh vd., 2012; da Costa vd., 2014). Bunun yanında dış ortamdaki değişken çevre şartları dikkate alındığında, güvenilir ölçümler elde edebilmek için uzun ölçüm sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır (Huld vd., 2013). Dolayısıyla I-V eğrilerini ölçmek yerine, seçilen uygun model ve yöntemlerin yardımı ile hesaplayarak simülasyonunun gerçekleştirilmesi gereklidir.

Bir modülün I-V eğrisini simüle edebilmek ve elektriksel performansını hesaplayabilmek için rapor edilmiş yöntemlerin tamamına yakını, Şekil 2.14.'de temsili olarak gösterilen işlem adımlarını gerçekleştirmektedir. Seçilen eşdeğer devre modelinin yanında yöntemleri birbirinden ayıran temel fark ise referans model parametrelerinin hesaplanma biçimidir (Şekil 2.14.'deki koyu bölge).

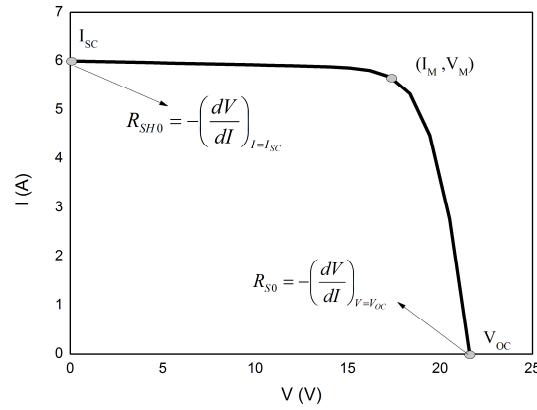


Şekil 2.14. Temsili olarak akım-gerilim (I-V) eğrilerinin simülasyonu ve elektriksel parametrelerinin hesaplanması

Bir modülün I-V eğrisini simüle etmek için kullanılan en yaygın modeller; tek ve çift diyot eşdeğer devre modelleridir (Gow ve Manning, 1999; Shockley, 1949). Bu modellerin en büyük artısı göze, modül veya örgü için genişletilebilir ve uygulanabilir olmasıdır (Tian vd., 2012). Daha karmaşık modeller olmasına rağmen

(üçlü diyot), uygulanabilirliklerinin düşük olması ve sahip oldukları aşırı hesaplama yükünden dolayı pek tercih edilmezler (Khanna vd., 2015). Seçilen model incelenen modülün, farklı çalışma şartlarına karşılık gelen elektriksel performansını doğru bir şekilde hesaplayabilmelidir (Jung ve Ahmed, 2012). Bir başka ifade ile hesaplanan ve ölçülen değerler uyumlu olmalıdır. Çift diyot eşdeğer devre modeli, düşük ısıtım değerlerinde veya gölgelendirme durumlarında tek diyot eşdeğer devre modeline göre daha iyi sonuçlar vermektedir (Elbaset vd., 2014; Ma vd., 2014). Buna rağmen, özellikle kristal tabanlı silisyum modüllerin I-V eğrilerini ve elektriksel performanslarını hesaplamak için kullanılan tek diyot eşdeğer devre modeli, sahip olduğu doğruluk ve hesaplama kolaylığı açısından, hala en çok tercih edilen modeldir (Jung ve Ahmed, 2012; Lo Brano vd., 2010).

Seçilen model için bir sonraki adım, modeli tanımlayan değişkenlerin hesaplanmasıdır. Bu değişkenler "model parametreleri" olarak adlandırılır. Tek diyot eşdeğer devre modeli dikkate alındığında, model parametreleri; I_L , I_0 , R_S , R_{SH} ve n 'dir (Phang vd., 1984). Tek diyot eşdeğer devre modeli aynı zamanda 5-parametre modeli olarak da adlandırılmaktadır. Eşdeğer devre modeli yaklaşımını kullanan tüm yöntemlerin en büyük zorluğu, model parametrelerinin hesaplanma sürecidir. Tek diyot eşdeğer devre modelinin genel ifadesi transandantal yapıda olduğundan, denklemin doğrudan ya da analitik çözümü yoktur (Chen vd., 2011; Jung ve Ahmed, 2012). 5 adet parametreyi hesaplayabilmek için en az 5 adet bağımsız denkleme ihtiyaç vardır. Rapor edilen yöntemlerin birçoğu bu 5 adet denklemi, referans I-V eğrisi üzerindeki belirli noktaları kullanarak elde etmektedir (Batzelis ve Papathanassiou, 2015; Ciulla vd., 2014; Mahmoud vd., 2013). Bu noktalar; açık-devre ($I = 0, V = V_{OC}$), kısa-devre ($I = I_{SC}, V = 0$), maksimum çıkış gücü ($I = I_M, V = V_M$), kısa devre noktasındaki türev (R_{SH0}) ve açık devre noktasındaki türev (R_{S0}) olup, bu noktaların referans I-V eğrisi üzerindeki konumları Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Buna rağmen, genel ifadenin transandantal yapısından dolayı, elde edilen denklemler lineer bir çözüm kümesi oluşturmazlar. Bir başka ifade ile bu denklemlerin çözümü birbirlerine bağlıdır. Bu nedenle, bu 5 adet denklemi çözebilmek için, genellikle belirli başlangıç değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. En çok kullanılan başlangıç değerleri R_{S0} ve R_{SH0} 'dir (Hadj Arab vd., 2004; Jack vd., 2015; Miceli vd., 2015; Phang vd., 1984; Villalva vd., 2009).



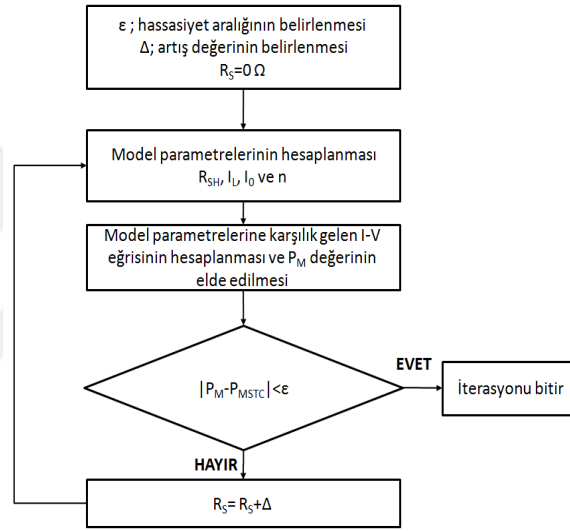
Şekil 2.15. Belirli noktaların akım-gerilim eğrisi üzerindeki konumları

Yöntemlerin sınıflandırılmasında kesin bir ayırım olmamasına rağmen, farklı çalışmalarda farklı başlıklar altında sınıflandırılmışlardır (Humada vd., 2016; Jack vd., 2015; Jena ve Ramana, 2015; Rus-Casas vd., 2014). Bunun nedeni, son yıllarda daha hızlı ve daha doğru sonuçlar elde edebilmek için, tüm yöntemlerin bir arada kullanılmasıdır. Örneğin rapor edilen bazı çalışmalarda; daha doğru simülasyon sonuçları elde edebilmek için analitik, iterasyon ve eğri uydurma yöntemleri bir arada kullanılmıştır (Can ve Ickilli, 2013; Lineykin vd., 2014; Orioli ve Di Gangi, 2013; Peng vd., 2014).

Klasik analitik yöntemlerde model parametreleri, ölçülen I-V eğrilerinden elde edilen başlangıç değerlerinden ve ortaya konan analitik yaklaşımlardan hesaplanmaktadır (Chan ve Phangd, 1987; Jia vd., 1995; Phang vd., 1984). Sonradan geliştirilen analitik yöntemlerde, model parametrelerini hesaplamak için gerekli olan bu başlangıç değerleri; belirli yaklaşımlar altında türetilen ve genellikle kataloglarda verilen elektriksel değerleri kullanan ifadelerden elde edilmektedir (Cubas vd., 2014b; Sera vd., 2007; Siddiqui vd., 2013). Bunun yanında, modül kataloglarında resim biçiminde sunulan I-V eğrilerinin sayısallaştırılması suretiyle de başlangıç değerlerini hesaplamak mümkündür (Tossa vd., 2014). Daha sonrasında ise, MATLAB veya Mathematica gibi özel yazılımlar içerisinde bulunan lineer olmayan denklem çözücülerin (fsolve.mat) veya belirli iterasyona dayalı olan nümerik (sayısal) çözme tekniklerinin yardımı ile 5 adet model parametresi hesaplanmaktadır (Bai vd., 2014; Bellia vd., 2014; Ciulla vd., 2014; De Soto vd., 2006; Jung ve

Ahmed, 2012; Salmi vd., 2012). Bazı yöntemlerde ise, başlangıç parametrelerinin değerleri kullanıcı tarafından belirlenir (Celik ve Acikgoz, 2007; de Blas vd., 2002).

Özellikle son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojisi ile beraber hesaplama hızının artması, iterasyon, optimizasyon ve eğri uydurma yöntemlerine olan ilgiyi de arttırmıştır. İterasyon yöntemlerinde, öncelikli olarak bir model parametresi belirlenir. Seçilen bu parametreye (genellikle R_s parametresine), başlangıç değeri sıfır olmak üzere, adım adım belirlenen artış (Δ) değerleri eklenerek, her defasında diğer model parametreleri (R_{SH} , I_L , I_0 ve n) hesaplanır (Şekil 2.16.).



Şekil 2.16. Temsili olarak iterasyon yöntemi kullanılarak model parametrelerini hesaplanması (Villalva vd., 2009)

Model parametrelerine karşılık gelen I-V eğrisi hesaplanmak suretiyle, maksimum çıkış gücü (P_M) elde edilir. Bu güç değeri, modül üreticilerin referans şartlarında sunduğu maksimum çıkış gücü (P_{MSTC}) ile karşılaştırılır. Bu iki değer arasındaki fark, istenilen hassasiyet aralığının (ϵ) altında ise, iterasyon işlemi sonlandırılarak model parametrelerinin değerleri hesaplanmış olur (Bellia vd., 2014; de Blas vd., 2002; Villalva vd., 2009). Çalışma prensibi iterasyon yöntemine benzer olsa da, optimizasyon ve iterasyonu birbirinden ayıran en temel fark, optimizasyon yönteminde birden fazla parametre için hata değerinin dikkate alınmasıdır (Siddiqui ve Abido, 2013). Bunun nedeni, bir parametre değerinin iyileştirilirken diğer parametrelerin olası iyi değerlerinden uzaklaşmasını engellemektir (Can ve Ickilli,

2013). Optimizasyon yöntemi, farklı tekniklerle hesaplama yapan birçok yöntemin en genel halidir; Nelder-Mead Metodu (Shahat, 2014) ve genel algoritma metodu gibi (Cotfas vd., 2013).

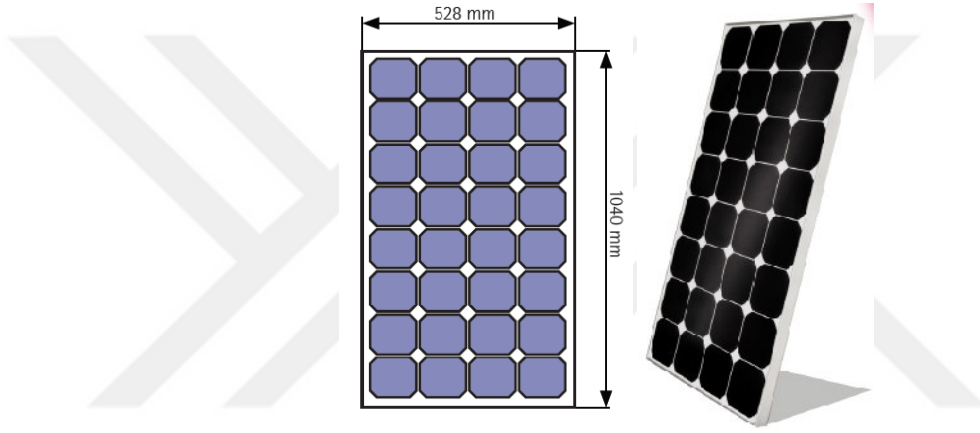
Eğri uydurma yöntemi, optimizasyon yönteminden farklı olarak, I-V eğrisindeki tüm veri noktalarını kullanan bir yöntemdir (Peng vd., 2013; Wolf ve Benda, 2013). Genellikle, uydurulan (fitting) ve bilinen (ölçülen veya sayısallaştırılmış olan) veri noktaları arasındaki farkı ifade eden bir hata fonksiyonu tanımlanarak, uygun iterasyon tekniklerinin yardımı ile model parametreleri hesaplanmaktadır (Chen vd., 2011; Lineykin vd., 2014). Eğri uydurma yöntemlerinde en çok kullanılan hesaplama biçimi en küçük kareler tekniğidir (Laudani vd., 2014; Peng vd., 2014). Bunun yanında farklı teknikleri de kullanmak mümkündür; ortalama karekök hata, mutlak hata, ortalama mutlak hata (Laudani vd., 2014).

Son yıllarda, belirli ücretler karşılığında ticari olarak temin edilebilen paket yazılımlar kullanılarak da model parametrelerini, fotovoltaiik modül ve/veya örgülerin elektriksel performanslarını hesaplamak mümkündür. Bu yazılımların bazıları; TRNSYS, PVsyst, INSEL ve PV F-Chart'tır (Lalwani vd., 2010). Bunların dışında, fazla kabul görmeyen ücretsiz paket programları da temin etmek mümkündür.

Modül performansını hesaplamada kullanılacak yöntemin seçimi, belirli ölçütlere göre yapılmalıdır. Araştırmacılar açısından, doğruluk en temel belirleyici ölçüttür. Ancak, küçük ölçekli/son kullanıcılar veya fotovoltaiik sistem tasarımcıları için seçilen yöntemin uygulanabilirliği ve hesaplama kolaylığı daha önemlidir. Güvenilir bir sistem tasarımı için kolay, hızlı ve doğruluğu yüksek bir yöntemin gerekliliği kaçınılmazdır (De Soto vd., 2006). Seçilen yöntem birçok amaca cevap verebilmelidir; maksimum güç noktasının davranışını izleyebilmeli, sistemin anlık verimliliğini hesaplayabilmeli ve/veya anlık olarak elektriksel parametrelerin hesaplanmasında kullanılabilmelidir (Elbaset vd., 2014).

3. MATERYAL

Bu tez çalışmasında ticari olarak temin edilmiş AS-HPC marka fotovoltaiik modül kullanılmıştır. Bu modül, elektriksel olarak seri bağlanmış 12,7 cm x 12,7 cm ebatlarında 32 adet alttan temaslı tek kristalli silisyum gözeden meydana gelmektedir (Şekil 3.1.). Tez çalışması süresince incelenen modül "test modülü" olarak adlandırılmıştır. Test modülünün katalog bilgileri Ek A.'da verilmiştir.



Şekil 3.1. Test modülünün boyutları ve fiziksel görünümü

Ticari olarak temin edilebilen birçok modülden farklı olarak, incelen modülün katalogunda farklı çalışma şartları için akım-gerilim (I-V) eğrileri kullanıcıya sunulmamıştır. Test modülünün katalogunda yer alan bazı değerler Çizelge 3.1.'de belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında, test modülünün akım-gerilim (I-V) eğrileri, 2003 yılında Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Temiz Enerji Kaynakları Araştırma Laboratuvarlarında kurulan çok kanallı ölçüm sistemi üzerinden elde edilmiştir. Bu sistemde "Solar Measuring for Characterization of Solar Cells (SMS)" isimli bir kontrol programı, H&H elektronik yük ve Agilent 37920A tarayıcı (switch) yardımı ile aynı anda 20 adet fotovoltaiik modülün I-V eğrileri ve ölçüm esnasındaki ışıyım istatistiği ölçümleri hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ölçülen I-V eğrilerinden hesaplanan verim (η) ve dolum çarpanı (FF) gibi parametrelerinin doğru olması için, en az 150 W/m²'lik bir ışıyım değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ölçüm sisteminde

bulunan Agilent 37920A tarayıcıya ölçülmek istenilen çevre parametresine göre farklı sensörler bağlanabilmektedir (Eke, 2007).

Çizelge3.1.Test modülünün katalog değerleri

Parametre	Değer
P_{MREF} (Watt)	100,00
I_{MREF} (Amper)	5,60
V_{MREF} (Volt)	17,80
I_{SCREF} (Amper)	6,00
V_{OCREF} (Volt)	21,60
α (ppm/°C)	600
β (ppm/°C)	-2800
γ (ppm/°C)	-3800
Aktifmodülalanı (m ²)	0,52
N_s	32

Bir fotovoltaiik modülün I-V eğrisini simüle edebilmek için, çalışma şartlarına karşılık gelen ışı nım (G) ve modül sıcaklığı (T_M) değerleri bilinmelidir. Hâli hazırda ki ölçüm sisteminde sadece modül yüzeyine gelen ışı nım değerini ölçen bir adet Kipp-Zonnen CM11 model piranometre mevcuttur. Diğer yandan, fotovoltaiik modülün sıcaklık katsayılarını hesaplayabilmek için ise, I-V eğrileri ve T_M eş zamanlı olarak ölçülmelidir. Bu amaçla, çok kanallı ölçüm sistemine modül sıcaklığını (T_M) ve ilaveten çevre sıcaklığını (T_C) da ölçebilmek için iki adet ince film Pt-100 sıcaklık sensörü entegre edilmiştir. Sıcaklık sensörlerinin hassasiyeti $\pm 0,3^\circ\text{C}$ 'dir. Bu tez çalışmasında yapılan iyileştirmeler sayesinde I-V eğrisi, G, T_M ve T_C değerleri eş zamanlı olarak ölçülebilir hale gelmiştir. Agilent 37920A tarayıcı üzerinde, iki adet 4 bacaklı Pt-100 sıcaklık sensörünü bağlamak için kanallar ayrılmıştır. Sıcaklık sensörlerinin bağlanacağı kanallar ve bağlantı düzeni ölçüm sisteminin kataloğunda belirtilmiştir. Test modülün bulunduğu konum ile ölçüm sistemi arasındaki mesafe yaklaşık 10 metredir. Bu uzaklığa uygun iki adet bağlantı

kablosu hazırlanmıştır. Ölçüm sistemi, modül ve çevre sıcaklığını 4 nokta yöntemi ile ölçtüğünden, bağlantı dirençlerinin sıcaklık okuma hassasiyetine bir etkisi yoktur.

SMS programında, ölçüm sisteminin 2. kanalına bağlanan sıcaklık sensörü *modül sıcaklığı* (T_M), 3. kanalına bağlanan sıcaklık sensörü ise *çevre sıcaklığı* (T_C) olarak tanımlanmıştır. Buna rağmen, hangi sıcaklık sensörünün nerenin sıcaklığını ölçeceği tamamen kullanıcı tarafından belirlenir. Her iki sıcaklık sensörü aynı anda modül sıcaklığını ya da çevre sıcaklığını ölçebilir. Sıcaklık sensörü, modülün arka yüzeyine, modül içerisindeki gözenin tam ortasına gelecek şekilde, ticari olarak temin edilmiş ısıl bileşen kullanılarak yapıştırılmıştır. Böylece sıcaklık sensörü ile modül yüzeyi arasındaki ısıl iletkenlik sağlanmıştır. Ayrıca, sıcaklık sensörünün çevre sıcaklığından ve olası rüzgâr değişimlerinden etkilenmemesi için üzeri izole bant ile kaplanmıştır.

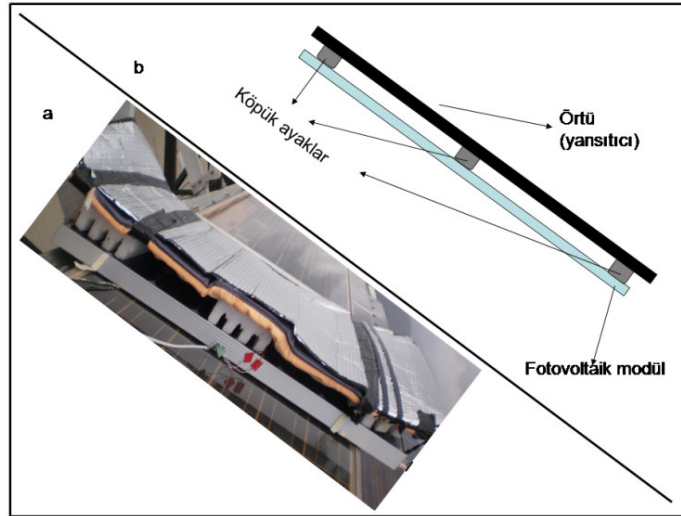
Akım-gerilim (I-V) eğrisinin ölçüm işleminden sonra, ölçüm süresince ışıyım ortalaması (G_{AVE}), ışıyımın maksimum değeri (G_{MAX}), ışıyımın minimum değeri (G_{MIN}), yüzde olarak değişimi (deviation), modül (T_M) ve çevre (T_C) sıcaklık değerleri ile ölçülen I-V eğrisi ve bu eğriye karşılık gelen P-V eğrisi bilgisayar ekranında kullanıcıya gösterilmektedir (Eke, 2007).

SMS programı, belirlenen zaman aralıklarında ölçülen her bir I-V eğrisinden hesaplanan (I_{SC} , V_{OC} , I_M , V_M , FF) ve ölçülen parametreler (G_{MAX} , G_{MIN} , G_{AVE} , %G, T_M , T_C) ile beraber; ölçülen her bir I-V eğrisine karşılık gelen bir seri numarası (identifier), ölçüm zamanı, ölçüm tarihi, modül alanı ve modül tipi gibi bilgileri bir metin dosyasına kaydetmektedir (_parameter.txt). Ölçülen her bir I-V eğrisinin akım ve gerilim verileri ise tarih bilgisini, ölçüm zamanını, ölçüm sırasını belirten ve seri numara (identifier) bilgisini içeren bir adla başka bir metin dosyasına kaydedilir (Eke, 2007). Bu tez çalışmasında, modül üzerine düşen ışıyım değeri, ortalama ışıyım değeri ($G=G_{AVE}$) ve modül arka yüzey sıcaklığı ise modül sıcaklığı (T_M) olarak kabul edilmiştir.

Tez çalışmasında 20 adet gerilim değerine karşı 20 adet akım değeri ölçülerek I-V eğrisi taranmıştır. Bu ölçüm zamanı yaklaşık olarak 7 saniyedir. Bir I-V eğrisinin ölçümü esnasında, modül üzerine düşen ışıyım (G) ve modül sıcaklığı (T_M) sabit kalmalıdır. Aksi halde I-V eğrisinden elde edilen elektriksel parametreler (I_{SC} , V_{OC} , I_M , V_M , P_M vb.), ölçümün gerçekleştirildiği G ve T_M değerlerine karşılık gelmezler.

Bu yüzden ısınım değişiminin %2'den büyük olduğu I-V eğrisi ölçümleri dikkate alınmamıştır.

Dış ortamda gölgelenen modülün görüntüsü Şekil 3.2.'te gösterilmiştir. Fotovoltaik modülün gölgelenmesinde yaklaşık 2 cm kalınlığında, modül ebatlarına uygun bir örtü kullanılmıştır. Örtü ile modül arasındaki havalandırmanın sağlanması, ısınımdan dolayı ısınan örtünün modül sıcaklığını arttırmasının önlenmesi ve gölgelenme durumunda modül sıcaklığının olabildiğince çevre sıcaklığına yakın bir değerde olmasını sağlamak amacı ile; modül ve örtü arasına 6 adet 4 cm kalınlığında ısı iletimi düşük olan köpük ayaklar yerleştirilmiştir. İlâveten modül gölgelenmesinde kullanılan örtünün olabildiğince az ısınmasını sağlamak için örtünün üzerine yansıtıcı ilave bir örtü yerleştirilmiştir (Şekil 3.2.).

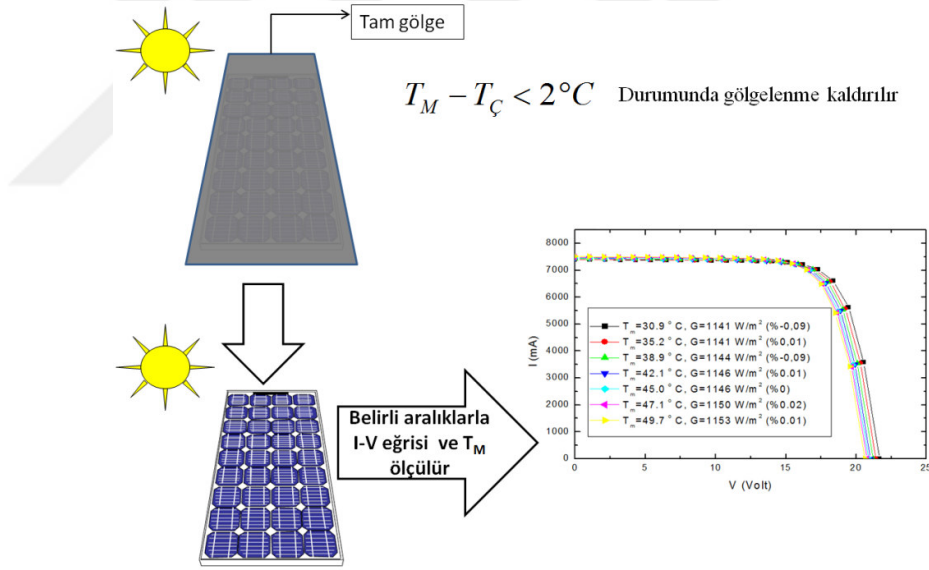


Şekil 3.2. Gerçek (a) ve temsili (b) gölgelendirme durumunun gösterilmesi

4. YÖNTEM

4.1. Dış Ortamda Sıcaklık Katsayılarının Elde Edilmesi

Dış ortamda, sıcaklık katsayılarını elde edebilmek için gerekli olan sıcaklık farkı, gölgelendirme yöntemi ile sağlanmıştır. Gölgeleyen modül sıcaklığının, çevre sıcaklığına yakın ($T_M - T_C < 2^\circ\text{C}$) bir değere gelmesi beklenir. Daha sonrasında gölgelenmenin kaldırılması ile modül sıcaklığı, o andaki çevre şartları tarafından belirlenen bir çalışma sıcaklığına kadar artmaya devam eder (King vd., 1997). Bu süre zarfında, belirlenen zaman aralıklarında modülün I-V eğrileri ve modül sıcaklıkları eş zamanlı olarak ölçülür (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Dış ortamda gölgelendirme yöntemi ile modül sıcaklığı (T_M) ve I-V eğrilerinin ölçülmesi

Kısa devre akımı ve açık devre gerilimi sıcaklık katsayıları olan α ve β ; açık ve güneşli günlerin öğle saatlerinde gerçekleştirilen ölçümlerden hesaplanmıştır. Böylece spektral dağılımın etkisi en aza indirilmiştir (Perraki ve Kounavis, 2016). Bu ölçümlerde I-V eğrileri ve modül sıcaklığı değerleri eş zamanlı olarak 2 dakikalık aralıklarla alınmıştır. Modül sıcaklığına bağlı olarak ölçülen her bir I-V eğrisi için,

G, T_M , I_{SC} ve V_{OC} değerleri ilgili tarihteki "_parameter.txt" dosyasından alınmıştır. Bu tez çalışmasında α ve β 'yı hesaplayabilmek için kullanılan ifadeler aşağıda belirtilmiştir (King vd., 1997; Ortiz-Rivera ve Peng, 2005).

$$I_{SC} = I_{SCREF} \frac{G}{1000} (1 + \alpha(T_M - 25)) \quad (4.1)$$

$$V_{OC} = V_{OCREF} (1 + \beta(T_M - 25)) \quad (4.2)$$

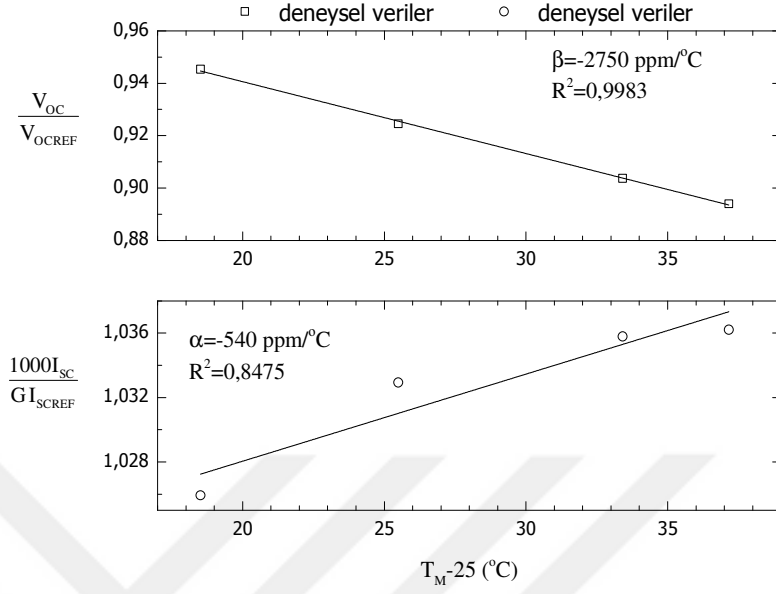
İlgili sıcaklık katsayılarını (α ve β) hesaplayabilmek için çizilmesi gereken grafiklere ait eksenler, eşitlik(4.1) ve (4.2) 'ye uygun olarak Çizelge 4.1.'de belirtilmiştir.

Çizelge4.1. Sıcaklık katsayılarını hesaplayabilmek için çizdirilmesi gereken grafiklerin eksen tanımları

Eğimin karşılığı	Düşey eksen	Yatay eksen
Kısa Devre Sıcaklık Katsayısı, α (ppm/°C)	$\frac{1000I_{SC}}{GI_{SCREF}}$	$T_M - 25$
Açık Devre Sıcaklık katsayısı, β (ppm/°C)	$\frac{V_{OC}}{V_{OCREF}}$	$T_M - 25$

14 Haziran 2014 tarihinde, modül sıcaklığına bağlı olarak ölçülen I-V eğrilerinden elde edilen deneysel verileri kullanarak, α ve β 'yı hesaplamak için çizilmesi gereken grafikler Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Bu grafiklere en küçük kareler yöntemi ile uydurulan doğrusal fonksiyonların (siyah çizgiler) eğimleri, doğrudan I_{SC} ve V_{OC} parametrelerinin sıcaklık katsayıları olan α ve β 'ya karşılık gelmektedir (Dash vd., 2015; Kamkird vd., 2012). Eğri uydurma sonucu hesaplanan R^2 değerleri, uydurulan (fit) doğrunun deneysel verilerle olan uyumunu/örtüşmesini ifade etmektedir. R^2 analizi 0 ile 1 ($0 \leq R^2 \leq 1$) aralığında değerler almaktadır. Uydurulan doğru ile deneysel verilerin tam olarak örtüştüğü durumda R^2 'nin aldığı değer 1'dir.

Bu sıcaklık katsayıları, dış ortamda ölçülen verilerden hesaplandığından, dış sıcaklık katsayıları olarak adlandırılırlar.



Şekil 4.2. Sıcaklık katsayılarını hesaplayabilmek için çizdirilmesi gerekli grafikler (Çizelge 4.1.'e uygun olarak)

Dış ortamdaki ölçümlerden elde edilen sıcaklık katsayıları, uluslararası standartlarda belirlenen rüzgâr hızının 2 m/s'den düşük olduğu durumlar için incelenmiştir. Test modülü, 30° 'lik yatay açı ile ve güneyden batıya 5° 'lik bir sapma ile güneybatı yönelimli olarak Şekil 4.3.'deki gibi konumlandırılmıştır.



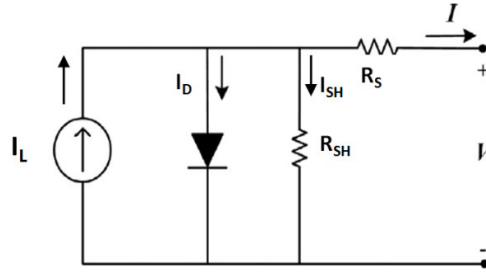
Şekil 4.3. Test modülünün bulunduğu konum

4.2. Akım-Gerilim (I-V) Eğrilerinin Simülasyonu

Çalışmanın bu kısmında, seri direnç başlangıç değerini ve referans model parametrelerini hesaplamak için türetilen yeni bağıntı ve yöntem ortaya konmuştur. Bundan başka, güncel model parametrelerinin ve modül performansının hesaplanması ile I-V eğrilerinin simüle edilmesi ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

4.2.1. Referans model parametrelerinin hesaplanması

Bu tez çalışmasında incelen test modülünün akım-gerilim (I-V) eğrisi tek diyot eşdeğer devre modeli kullanılarak simüle edilmiştir. İdeal diyot yaklaşımı, gözenin çalışmasını teorik olarak ifade etmesine rağmen, pratik uygulamalarda kullanılan bir model değildir. Daha gerçekçi bir modelleme yapılabilmesi için, fotovoltaik akımın karşılaştığı direnci temsil eden seri direnç (R_S) ve p-n eklemde meydana gelen kayıpları ifade eden paralel direnç (R_{SH}) etkilerinin de değerlendirilmesi gereklidir (Khan vd., 2013; Wang vd., 2011). Bu modelde, fotovoltaik modülün elektronik eşdeğer devresi; fotovoltaik akımı temsil eden bir akım kaynağı, bu akım kaynağına paralel bağlanmış bir diyot ve bir paralel direnç ile bunlara seri bağlanan bir dirençten meydana gelir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Basitleştirilmiş tek diyot elektronik eşdeğer devre modeli

Tek diyot modelinin Şekil 4.4.'te gösterilen eşdeğer devresindeki akımların (I , I_L , I_D ve I_{SH}) yönleri dikkate alındığında ve bu akımlar için Kirchhoff Kanunu uygulandığında elde edilen eşitlik aşağıda gösterilmiştir.

$$I_L = I_D + I_{SH} + I \quad (4.3)$$

Modül çıkış akımını (I) elde edebilmek için, eşitlik (4.3)'ün düzenlenmiş hali aşağıdaki gibidir.

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (4.4)$$

Diyottan ve paralel dirençten geçen akım ifadeleri eşitlik (4.4)'te yerlerine yazıldığında, tek diyot eşdeğer devre modelinin genel ifadesi elde edilir.

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V + IR_S)}{Ak_B T}} - 1 \right) - \frac{(V + IR_S)}{R_{SH}} \quad (4.5)$$

Burada V; Şekil 4.4.'te artı(+) ve eksi(-) ile gösterilen uçlara bağlanacak olan yük direnci üzerine düşen gerilimi, k_B ; Boltzmann sabitini, q; elektronun yükünü ve A; düzeltilmiş diyot faktörünü ifade etmektedir. Düzeltilmiş diyot faktörünün göze diyot faktörü cinsinden ifadesi aşağıda belirtilmiştir.

$$A = nN_s \quad (4.6)$$

Buradan; modül içerisindeki tek bir gözenin diyot faktörü ve N_s ; modül içerisindeki seri bağlanmış göze sayısıdır. Değişen gerilime (V) karşı modülden çekilen akım (I) değerini hesaplayabilmek için tek diyot eşdeğer devre model parametreleri bilinmelidir. Bu parametreler, fotovoltajik akım (I_L), ters doyma akımı (I_0), düzeltilmiş diyot faktörü (A), seri direnç (R_S) ve paralel direnç (R_{SH})'tir. Tek diyot eşdeğer devre model parametrelerinin bilinmesi durumunda bile, denklem (4.5)'i, akım parametresini (I) tek başına bırakacak şekilde manipüle etmek mümkün değildir. Bir başka ifade ile denklem (4.5)'in analitik çözümü yoktur (Kavasoglu ve Kavasoglu, 2009). 5 adet model parametresini hesaplayabilmek için; en az 5 adet bağımsız denklem gerekmektedir. İhtiyaç duyulan denklem sayısını azaltmak için, mevcut çalışmalarda oldukça yaygın olan sabit diyot faktörü yaklaşımı kullanılmıştır (De Soto vd., 2006; Orioli ve Di Gangi, 2013; Tossa vd., 2014; Villalva vd., 2009). Bu yaklaşıma göre diyot faktörü (n) ve dolayısıyla düzeltilmiş diyot faktörü (A), ışıınım (G) ve modül sıcaklığından (T_M) bağımsız olup; sadece fotovoltajik gözeyi oluşturan yarıiletkenlerin metalürjik eklem ara yüzeyinin fiziksel özelliklerine bağlı olduğu kabul edilmiştir. Buna göre, tek kristalli silisyum göze için diyot faktörü 1,2

olarak alınmıştır (Bellia vd., 2014). Böylece test modülü için düzeltilmiş diyot faktörünün değeri; $N_s=32$ olmak üzere eşitlik (4.6) kullanılarak 38,4 olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu yaklaşımdan sonra, model parametrelerini hesaplamak için gerekli olan denklem sayısı 4'e indirgenmiştir. Bu denklemleri elde etmek için, modülün referans (Standard Test Koşulları) I-V eğrisi üzerindeki belirli noktalar olan; kısa devre akımı noktası ($V=0$, $I=I_{SCREF}$), açık devre gerilimi noktası ($V=V_{OCREF}$, $I=0$), maksimum çıkış gücü noktası ($V=V_{MREF}$, $I=I_{MREF}$) ve açık devre gerilimi noktasındaki I-V eğrisinin ters eğimi (R_{S0REF}) kullanılmıştır. Bu belirli noktalara karşılık gelen koşulların her biri denklem (4.5)'e uygulandığında elde edilen denklemler aşağıda belirtilmiştir (Ciulla vd., 2014; Tossa vd., 2014).

$$I_{LREF} = \frac{(R_{SREF} + R_{SHREF})}{R_{SHREF}} I_{SCREF} \quad (4.7)$$

$$I_{0REF} = \frac{I_{LREF} - \frac{V_{OCREF}}{R_{SHREF}}}{\left(e^{\frac{qV_{OCREF}}{A_k B T_{REF}}} - 1 \right)} \quad (4.8)$$

$$R_{SREF} = R_{S0REF} - \frac{1}{\frac{q}{A_k T_{REF}} I_{0REF} e^{\frac{qV_{OCREF}}{A_k B T_{REF}}}} \quad (4.9)$$

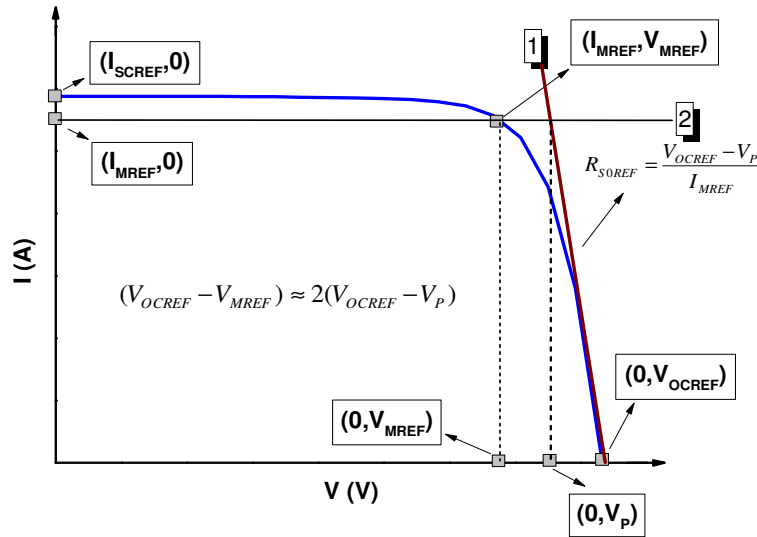
$$R_{SHREF} = \frac{(V_{MREF} + I_{MREF} R_{SREF})}{I_{LREF} - I_{MREF} - I_{0REF} \left(e^{\frac{q(V_{MREF} + I_{MREF} R_{SREF})}{A_k B T_{REF}}} - 1 \right)} \quad (4.10)$$

Yukarıda elde edilen denklemlerden, denklem(4.7) ve denklem (4.9)'da kullanılan yaklaşımlar Ek B.'de gösterilmiştir. Elde edilen denklemlerin çözümü birbirlerine bağlıdır. Bir başka ifade ile denklem (4.7)-(4.10) bağımsız bir denklem takımı oluşturmazlar. Bu yüzden, model parametrelerini hesaplayabilmek için referans şartlarındaki seri (R_{S0REF}) ve paralel (R_{SH0REF}) dirençlerin başlangıç değerleri bilinmelidir. Bu iki başlangıç değerinin seçimi birbirlerinden oldukça farklıdır. R_{SREF} 'in ve dolayısıyla hesaplanacak diğer parametreler olan R_{SHREF} , I_{LREF} ve I_{0REF} 'nin doğruluğu, doğrudan olarak R_{S0REF} değerine bağlıdır, denklem (4.9). Bir başka ifade ile, doğru bir R_{S0REF} değeri, hesaplanacak olan model parametrelerinin doğruluğunu ifade etmektedir. Diğer yandan R_{SH0REF} , doğrudan denklem (4.7)-

(4.10)'de yer almaz (Saloux E Teyssedou A, 2011; Villalva vd., 2009). Buna rağmen, model parametrelerini hesaplayabilmek için gereklidir. Mevcut çalışmalar incelendiğinde R_{SHOREF} değerini hesaplamak için farklı yaklaşımlar altında birçok ifadenin kullanıldığı tespit edilmiştir (Can ve Ickilli, 2013; de Blas vd., 2002; Humada vd., 2016). Bu tez çalışmasında R_{SHOREF} değeri, iterasyon/nümerik tekniklerine veya bilinen I-V eğrisine ihtiyaç duymadan, sadece modül kataloglarında sunulan parametrelerin yardımı ile, aşağıda belirtilen ifadeden hesaplanmıştır (Ciulla vd., 2014; Tossa vd., 2014).

$$R_{SHOREF} = \frac{V_{MREF}}{I_{SCREF} - I_{MREF}} \quad (4.11)$$

Ticari olarak temin edilebilen herhangi bir kristal silisyum tabanlı fotovoltaik modülün referans şartlarındaki I-V eğrisi incelendiğinde, açık devre gerilimi noktasındaki I-V eğrisinin ters eğimi (R_{S0REF}) ile modül kataloglarında sayısal değer olarak verilen bazı elektriksel parametreler arasında yeni bir bağıntı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.5. R_{S0REF} değerini hesaplamak için gerekli olan yeni bağıntının türetilmesi

Şekil 4.5.'teki 1 sayısı; I-V eğrisinin açık devre gerilimi noktasından teğet geçen doğruyu, 2 sayısı ise maksimum çıkış akımı ($I=I_{MREF}$, $V=0$) ve maksimum çıkış

gücü ($I=I_{MREF}, V=V_{MREF}$) noktalarından geçen doğruyu ifade etmektedir. 1 ve 2 numaralı doğrularının kesişim noktasının, gerilim eksenindeki izdüşümü ise V_P noktası olarak adlandırılmıştır. V_P noktasının, V_{MREF} ve V_{OCREF} noktalarının yaklaşık olarak ortasında yer aldığı belirlenmiştir, eşitlik (4.12).

$$(V_{OCREF} - V_{MREF}) \approx 2(V_{OCREF} - V_P) \quad (4.12)$$

Referans şartlarındaki I-V eğrisi için R_{SOREF} değerini, Şekil 4.5.'te geometrik olarak gösterilen ve aşağıda ifade edilen bağıntıdan hesaplamak mümkündür.

$$R_{SOREF} = \frac{V_{OCREF} - V_P}{I_{MREF}} \quad (4.13)$$

Bu durumda R_{SOREF} değerini, sadece modül kataloglarında sunulan elektriksel parametreler cinsinden, eşitlik (4.12)-(4.13)'ten elde edilen ve aşağıda belirtilen ifadenin yardımı ile hesaplamak mümkündür.

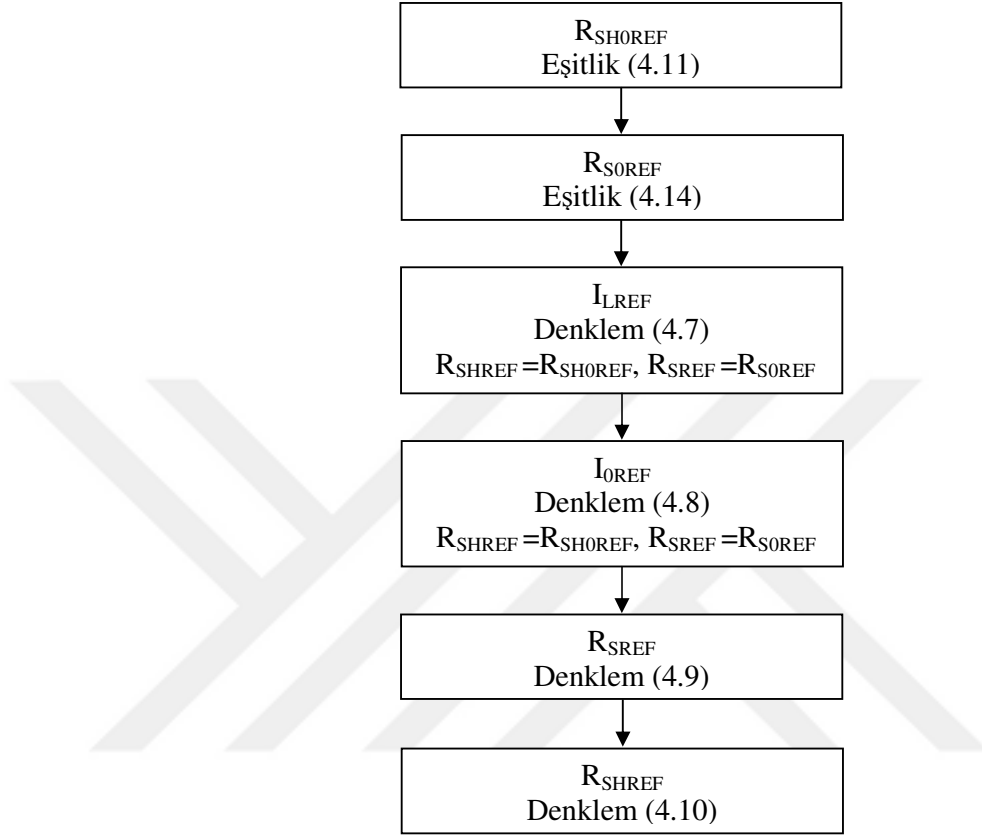
$$R_{SOREF} = \frac{V_{OCREF} - V_{MREF}}{2I_{MREF}} \quad (4.14)$$

Mevcut yöntemlerden farklı olarak R_{SOREF} değeri, ilk defa bu tez çalışmasında geometrik olarak türetilen eşitlik (4.14)'ten hesaplanmıştır. Test modülünün R_{SHOREF} ve R_{SOREF} değerlerini hesaplamak için gerekli olan elektriksel parametreler ve değerleri Çizelge 4.2.'de belirtilmiştir.

Yeni yöntem kullanılarak, sadece fotovoltaik modüllerin teknik kataloglarında sunulan elektriksel parametrelerinin yardımıyla; R_{SHOREF} ve R_{SOREF} değerlerinin ve referans model parametrelerinin (R_{SHREF} , R_{SREF} , I_{OREF} ve I_{LREF}) hesaplanması Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Elektriksel parametreler ve değerleri

Giriş Parametreleri	Değer
I_{SCREF} (A)	6,00
I_{MREF} (A)	5,60
V_{OCREF} (V)	21,60
V_{MREF} (V)	17,80



Şekil 4.6. Yeni yöntem ile referans model parametrelerinin hesaplanması

4.2.2. Güncel model parametrelerinin hesaplanması

Modülün herhangi bir ışınım (G) ve modül sıcaklığı (T_M) değerindeki I-V eğrisini simüle edebilmek için, G ve T_M değerleri tarafından belirlenen güncel model parametreleri bilinmelidir. Güncel modül parametreleri (A , R_{SH} , R_S , I_L ve I_0), referans modül parametreleri (A , R_{SHREF} , R_{SREF} , I_{LREF} ve I_{0REF}) ve aşağıda belirtilen bağıntılar kullanılarak hesaplanmıştır. Düzeltilmiş diyot faktörü için yapılan yaklaşımın yanında, kullanılan bir diğer yaklaşım ise paralel direnç (R_{SH}) değerinin sadece ışıma bağlı olduğudur (De Soto vd., 2006; Tossa vd., 2014).

$$I_{SC} = I_{SCREF} \frac{G}{G_{ref}} (1 + \alpha(T_M - T_{ref})) \quad (4.15)$$

$$V_{OC} = V_{OCREF} \left(1 + \beta(T_M - T_{REF}) + \frac{Ak_B T_M}{V_{OCREF} q} \ln \left(\frac{G}{G_{REF}} \right) \right) \quad (4.16)$$

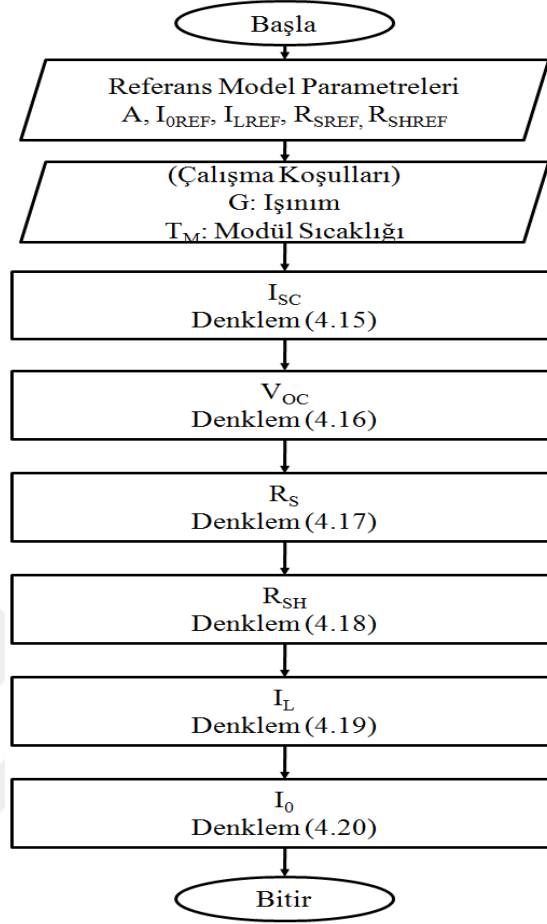
$$R_S = R_{SREF} \frac{T_M}{T_{REF}} \left(1 - 0,217 \ln \left(\frac{G}{G_{REF}} \right) \right) \quad (4.17)$$

$$R_{SH} = R_{SHREF} \frac{G}{G_{REF}} \quad (4.18)$$

$$I_L = \left(\frac{R_S + R_{SH}}{R_{SH}} \right) I_{SC} \quad (4.19)$$

$$I_0 = \frac{\frac{(R_{SH} + R_S)}{R_{SH}} I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_{SH}}}{\frac{qV_{OC}}{e^{Ak_B T_M} - 1}} \quad (4.20)$$

Güncel model parametrelerini hesaplamak için eşitlik (4.15)-(4.20)'de yer alan α ve β sıcaklık katsayıları bilinmelidir. Bu tez çalışmasında test modülünün I-V eğrilerinin simülasyonunu gerçekleştirebilmek için gerekli olan güncel model parametreleri, farklı şekillerde elde edilen iç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanmıştır. İç sıcaklık katsayıları modül kataloğundan, dış sıcaklık katsayıları ise dış ortamda gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilmiştir. İç veya dış sıcaklık katsayıları için güncel model parametrelerinin hesaplanması temsili olarak Şekil 4.7.'de belirtilmiştir.



Şekil 4.7. Güncel model parametrelerinin hesaplanması

4.2.3. Akım-gerilim (I-V) eğrisinin simülasyonu ve modül performansının hesaplanması

Güncel model parametreleri (A , I_0 , I_L , R_S , R_{SH}) ve aşağıda genel ifadesi verilen Newton-Raphson yönteminin yardımı ile I-V eğrisinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Ismail vd., 2013).

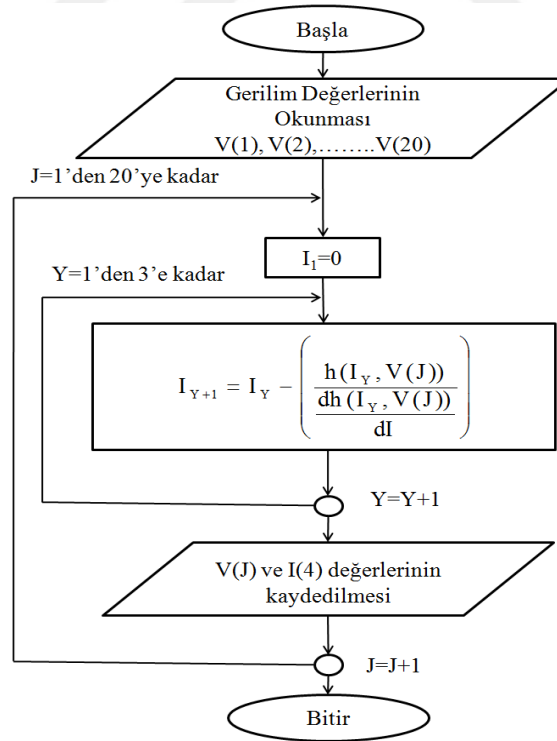
$$I_{Y+1} = I_Y - \left(\frac{h(I_Y, V)}{\frac{dh(I_Y, V)}{dI}} \right) \quad (4.21)$$

Burada, Y ; iterasyon sayısını, eşitlik (4.22) ile belirtilen $h(I_Y, V)$ ifadesi ise eşitlik (4.5)'in kapalı fonksiyon halini belirtmektedir. Bu ifadenin ($h(I_Y, V)$) akım parametresine göre olan türevi ise eşitlik (4.23) ile ifade edilmiştir.

$$h(I_Y, V) = I_Y - I_L + I_0 \left(e^{\frac{q(V+I_Y R_S)}{A k_B T_M}} - 1 \right) + \frac{(V + I_Y R_S)}{R_{SH}} \quad (4.22)$$

$$\frac{dh(I_Y, V)}{dI} = 1 + \frac{q R_S}{A k_B T} I_0 e^{\frac{q(V+I_Y R_S)}{A k_B T_M}} + \frac{R_S}{R_{SH}} \quad (4.23)$$

Belirli bir iterasyon adımından sonra ($Y=3$) eşitlik (4.21) ile ifade edilen akım değeri yakınsamaktadır. Böylece eşitlik (4.21)'deki gerilim (V) değerine karşılık gelen akım (I) değeri hesaplanmış olur. Her bir gerilim değeri için, akımın başlangıç değeri ($Y=1, I_1=0$) sıfır alınmıştır. 20 adet gerilim değerine karşılık gelen 20 adet akım değerinin türetilmesi Şekil 4.8.'de özetlenmiştir. Bu gerilim değerleri, simülasyonu yapılacak olan ölçülmüş I-V eğrisine ait verilerin kaydedildiği metin dosyasından alınmıştır.



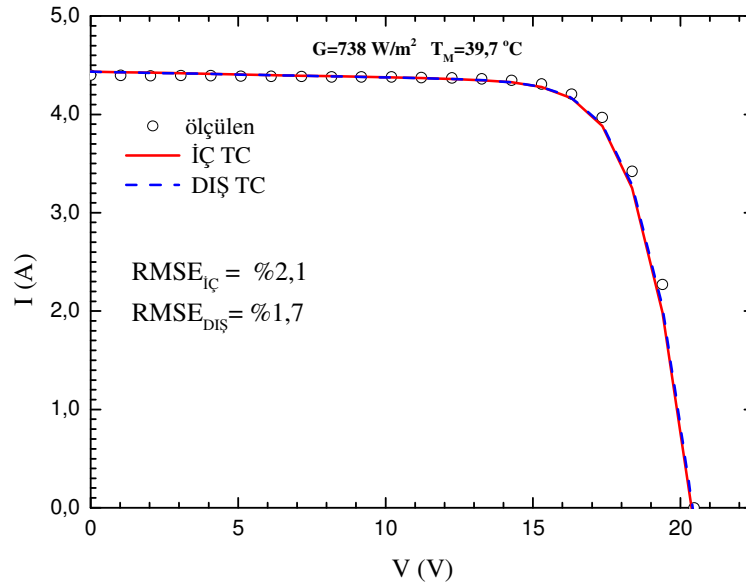
Şekil 4.8. Newton-Raphson yöntemi ile I-V eğrisinin simülasyonu

Hesaplanan ve ölçülen eğrilerin (değerlerin) karşılaştırılması, bağıl ortalama karekök hata (RMSE; root mean square error) yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir (Paulescu vd., 2014).

$$RMSE(\%) = 100 \frac{\sqrt{N \sum_{i=1}^N (Z_{CALC} - Z_{MEAS})^2}}{\sum_{i=1}^N Z_{MEAS}} \quad (4.24)$$

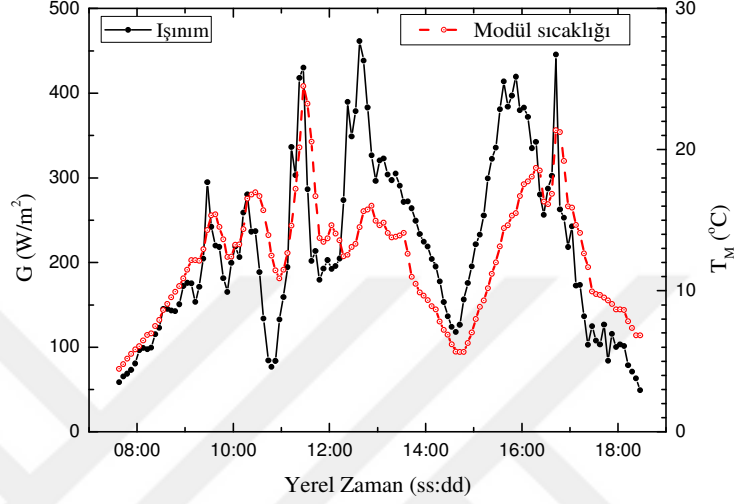
Burada, Z_{CALC} , Z_{MEAS} ve N sırası ile hesaplanan değere, ölçülen değere ve veri (ölçüm) sayısına karşılık gelmektedir. İç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanan hata değerleri $RMSE_{İÇ}$ ve $RMSE_{DİŞ}$ ile belirtilmiştir.

Test modülünün I-V eğrileri ve bu eğrilerin çalışma şartlarına karşılık gelen G ve T_M değerleri 5 dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Ölçülen G ve T_M değerleri kullanılarak, iç ve dış sıcaklık katsayıları için I-V eğrilerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Ölçülen ve simüle edilen I-V eğrilerinin bir grafik programının yardımı ile çizdirilmesi örnek olarak Şekil 4.9.'da gösterilmiştir. Grafikleri çizdirmek, $RMSE_{İÇ}$ ve $RMSE_{DİŞ}$ değerlerini hesaplamak için gerekli olan gerilim ve akım değerleri Ek C.'de verilmiştir.



Şekil 4.9. Ölçülen ve hesaplanan I-V eğrileri

Seçilen bir gün için, test modülünün maksimum çıkış gücü değerlerini hesaplayabilmek için, öncelikle llen G ve T_M değerleri (şekil 4.10.) kullanılarak, i ve dış sıcaklık katsayıları için I-V eğrilerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir.



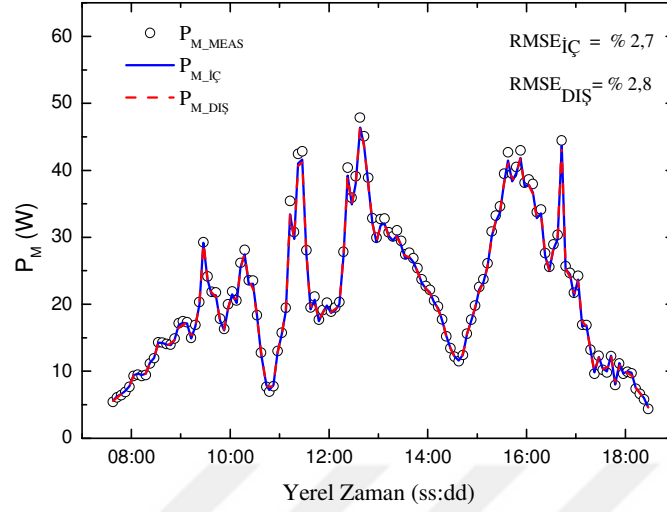
şekil 4.10. Gün boyunca llen G ve T_M değerleri (09 Nisan 2015)

Ölçülen, i ve dış sıcaklık katsayıları için simüle edilen her bir I-V eğrisinden, ölçülen maksimum çıkış gücü (P_{M_MEAS}), iç sıcaklık katsayısı için hesaplanan maksimum çıkış gücü ($P_{M_I}$) ve dış sıcaklık katsayısı için hesaplanan maksimum çıkış gücü ($P_{M_DIş}$) değerleri elde edilmiştir. Bu değerler bir grafik programının yardımı ile ölçüm zamanına karşı st üste çizdirilerek şekil 4.11.'de gösterilmiştir.

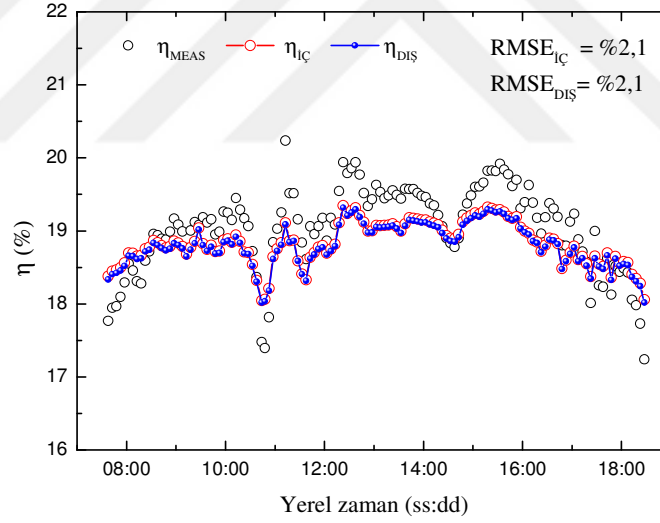
Modüle ait verimlilik değerini hesaplayabilmek için aşağıda belirtilen ifade kullanılmıştır.

$$\eta = \frac{P_M}{P_{IN}} = \frac{P_M}{GA_M} \quad (4.25)$$

Burada P_M ; llen veya hesaplanan çıkış gücünü, G ; llen ışınımı değerini ve A_M ; modülün aktif yüzey alanını ifade etmektedir. Verimlilik değerleri (η_{MEAS} , $\eta_{I}$ ve $\eta_{DIş}$), elde edilen maksimum çıkış gücü değerlerinden (P_{M_MEAS} , $P_{M_I}$ ve $P_{M_DIş}$) eşitlik (4.25)'e göre hesaplanmış ve ölçüm zamanına karşı st üste çizdirilerek şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



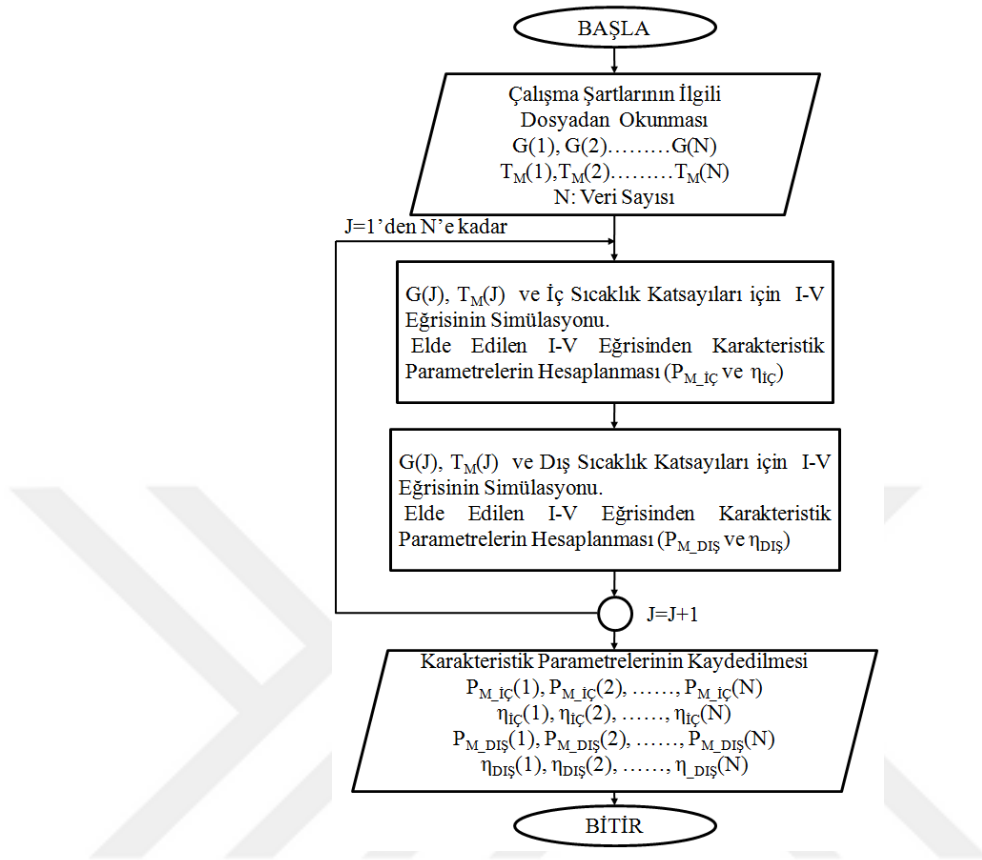
Şekil 4.11. Ölçülen ve hesaplanan maksimum çıkış gücü değerleri (09 Nisan 2015)



Şekil 4.12. Ölçülen ve hesaplanan verimlilik değerleri (09 Nisan 2015)

İlgili grafikler olan Şekil 4.10.-4.12.'yi çizdirebilmek ve grafikler üzerinde belirtilen hata değerlerini hesaplayabilmek için gerekli olan materyal Ek D.'de verilmiştir.

Çalışma şartları (G ve T_M) ve sıcaklık katsayıları (iç ve dış) için karakteristik parametrelerden olan maksimum çıkış gücünün (P_M) ve verimliliğin (η) hesaplanması temsili olarak Şekil 4.13.'de özetlenmiştir. Ölçülen G ve T_M değerleri seçilen güne ait "_parameter.txt" dosyasından alınmıştır.



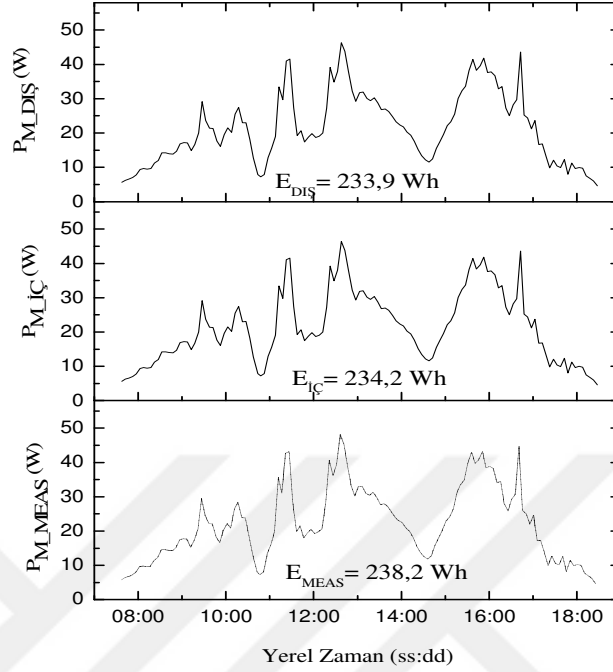
Şekil 4.13. Farklı çalışma şartları ve sıcaklık katsayıları için I-V eğrilerinin simülasyonu ve karakteristik parametrelerin hesaplanması

Modülün seçilen günlerdeki enerji çıktısı (E), bir grafik programının yardımı ile eşitlik (4.26)'ya uygun olarak P_M eğrilerinin (Şekil 4.11.) altında kalan alanın hesaplanması suretiyle elde edilmiştir.

$$E = \int P_M dt \quad (4.26)$$

Burada P_M ; belirlenen zaman aralığında fotovoltaik modüldençekilen maksimum çıkış gücünü, dt ise zaman aralığını ifade etmektedir.

Enerji çıktısı hesaplanacak olan gün için P_{M_MEAS} , $P_{M_İÇ}$ ve $P_{M_DİŞ}$ değerleri ölçüm zamanına karşı ayrı grafiklerde çizdirilmiştir (Şekil 4.14.). Grafiklerin çizdirildiği grafik programının integral alma seçeneği kullanılarak, Şekil 4.14.'teki eğrilerin altında kalan alanlar hesaplanmıştır.



Şekil 4.14. Temsili olarak P_M eğrilerinden enerji çıktısının hesaplanması

P_{M_MEAS} , P_{M_IC} , ve P_{M_DIS} eğrilerinden hesaplanan alan değerleri; ölçülen enerji çıktısına ($E_{MEAS} = 238,2$ Wh), iç sıcaklık katsayıları için hesaplanan enerji çıktısına ($E_{IC} = 234,2$ Wh) ve dış sıcaklık katsayısı için hesaplanan enerji çıktısına ($E_{DIS} = 233,9$ Wh) karşılık gelmektedir (Şekil 4.14.).

Ölçülen ve hesaplanan enerji çıktısı değerleri, mutlak bağıl hata (MAE: mean absolute error) yaklaşımı kullanılarak karşılaştırılmıştır (Paulescu vd., 2014).

$$MAE(\%) = 100 \frac{|E_{MEAS} - E_{CALC}|}{E_{MEAS}} \quad (4.27)$$

Burada E_{CALC} ; hesaplanan enerji çıktısını, E_{MEAS} ise ölçülen enerji çıktısını ifade etmektedir.

Bu tez çalışmasında I-V eğrileri, maksimum çıkış gücü (P_M), verimlilik (η) ve seçilen günlerde üretilen elektrik enerjisi veya enerji çıktısı (E); modülün elektriksel performansı veya kısaca modül performansı olarak tanımlanmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Dış Sıcaklık Katsayıları

Bu bölümde, dış ortamda gölgelendirme yöntemi ile farklı modül sıcaklıklarında ölçülen I-V eğrileri kullanılarak, $\alpha_{DİŞ}$ ve $\beta_{DİŞ}$ sıcaklık katsayıları hesaplanmıştır. Bu amaçla Nisan 2014-Eylül 2014 döneminde gerçekleştirilen ölçümlerin; tarihleri, zamanları, R^2 değerleri, ölçümler esnasındaki ışıyım (G) ve ışıyım değişimi (ΔG) değerleri ile hesaplanan dış sıcaklık katsayıları Çizelge 5.1.'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.1. Hesaplanan dış sıcaklık katsayıları ve istatistiksel bilgiler

Tarih	Saat	$\alpha_{DİŞ}$ (ppm/°C)	R^2	$\beta_{DİŞ}$ (ppm/°C)	R^2	G (W/m ²)	ΔG (%)
23 Nisan 2014	11:20	521	0,9415	-2870	0,9966	1027	0,8
24 Nisan 2014	11:20	457	0,8730	-2750	0,9823	1050	1,0
27 Mayıs 2014	12:31	512	0,7638	-2530	0,9998	1036	0,4
30 Mayıs 2014	12:50	686	0,9162	-2520	0,9586	1062	0,4
17 Haziran 2014	12:12	640	0,9123	-2890	0,9999	1011	0,3
14 Haziran 2014	12:20	540	0,8475	-2750	0,9938	947	0,8
28 Temmuz 2014	11:40	545	0,8354	-2520	0,9985	828	1,2
09 Temmuz 2014	14:05	636	0,9778	-2630	0,9984	907	0,4
01 Ağustos 2014	12:40	752	0,9712	-2880	0,9966	968	0,4
17 Ağustos 2014	11:10	577	0,8999	-2770	0,9987	804	0,5
27 Eylül 2014	12:35	595	0,9980	-2520	0,9942	931	0,6
07 Eylül 2014	12:43	554	0,9522	-2650	0,9986	1208	1,2

Elde edilen dış sıcaklık katsayıları için (Çizelge 5.1.) ortalama ve bağıl hata değerleri hesaplanmış ve Çizelge 5.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Ortalama sıcaklık katsayıları ve hata değerleri

Sıcaklık Katsayısı	Ortalama	Hata (%)
$\alpha_{DİŞ}$	585ppm/°C	%4,1
$\beta_{DİŞ}$	2690 ppm/°C	%1,6

Dış ortam ölçümlerinden elde edilen, $\alpha_{DİŞ}$ ve $\beta_{DİŞ}$ sıcaklık katsayıları için hesaplanan hata değerleri %4,1 ve %1,6'dır.

Kısa devre akımı sıcaklık katsayısı olan $\alpha_{DİŞ}$ için elde edilen hatanın nedenleri şu şekilde açıklanabilir. Kısa devre akımı, gelen ışığın spektral dağılımına ve foton akısına sıkıca bağlı olup, sıcaklıkla olan değişimi oldukça zayıftır (Cuce vd., 2013; Singh vd., 2008). Değişken çevre şartları yüzünden Çizelge 5.1.'de belirtilen ölçüm zamanları farklı olduğundan, foton akısı şiddeti de farklı olacaktır. Bu durumda $\alpha_{DİŞ}$ farklı değerler alacaktır. Spektral dağılımın ve foton akısı şiddetinin sabit olduğu aynı solar simülatörler kullanıldığında bile, simülatörlerin sahip olduğu sistematik hatalardan dolayı, kısa devre akımı sıcaklık katsayıları arasındaki farkın oldukça büyük çıkabileceği bildirilmiştir (Dupré vd., 2015). Bundan başka, dış ortamda gölgeleme yöntemi ile elde edilen sıcaklık farkı yaklaşık olarak 15°C ila 20°C aralığındadır. Dolayısıyla, bu sıcaklık aralığı için kısa devre akımında meydana gelen artış oldukça azdır ve ölçüm sistemi tarafından tam bir doğrulukla ölçülmesi mümkün olamayacağı bildirilmiştir (Muñoz-García vd., 2012; van Dyk vd., 2000).

Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısının hesabında, açık devre geriliminin ısıtım bağımlılığı, yüksek ısıtım değerlerinde gerçekleştirilen ölçümlerden dolayı ihmal edilmiştir. Buna rağmen, ısıtım bağımlılığının ihmal edilmediği durumda bile, 100 ila 1000 W/m²'lik ısıtım değeri aralığında, açık devre sıcaklık katsayısına olan etkisinin %5'i geçmediği rapor edilmiştir (King vd., 1997). Mevcut çalışmalar incelendiğinde, $\alpha_{DİŞ}$ ve $\beta_{DİŞ}$ için rapor edilen alt hata sınırlarının %8 ve %2 olabileceği bildirilmiştir (Fanney vd., 2006; Granata vd., 2011; van Dyk vd., 2000).

Test modülünün, ortalama dış sıcaklık katsayıları ($\alpha_{DİŞ}$ ve $\beta_{DİŞ}$) ile katalogta belirtilen iç sıcaklık katsayıları ($\alpha_{İÇ}$ ve $\beta_{İÇ}$) aşağıdaki Çizelge 5.3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. İç ve dış sıcaklık katsayıları

Kısa Devre Akımı Sıcaklık katsayısı	Değer (ppm/°C)	Açık Devre Gerilimi Sıcaklık katsayısı	Değer (ppm/°C)
$\alpha_{İÇ}$	600	$\beta_{İÇ}$	-2800
$\alpha_{DİŞ}$	585	$\beta_{DİŞ}$	-2690

Mevcut çalışmalarda, elde edilen dış sıcaklık katsayıları doğrudan iç sıcaklık katsayıları ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir (Fanney vd., 2006; Granata vd.,

2011; Osterwald vd., 1987). Bu çalışmada, mevcut çalışmalardan farklı olarak, iç ve dış sıcaklık katsayıları için dış ortamdaki modül performansı hesaplanmış ve ölçülen modül performansı ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalardan elde edilen bulgulara göre, Çizelge 5.3.'te belirtilen iç ve dış sıcaklık katsayılarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılmıştır (Bölüm 5.3.).

5.2. Seri Direnç Başlangıç Değeri İçin Türetilen Yeni Bağıntının İrdelenmesi

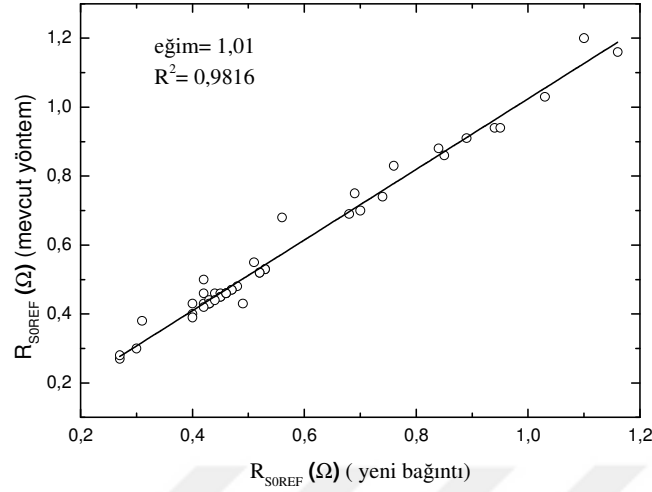
Bu bölümde, referans şartlarındaki seri direnç başlangıç (R_{S0REF}) değerini hesaplamak için türetilen yeni bağıntının doğruluğu irdelenmiştir. Bu amaçla, farklı çıkış gücünde ve elektriksel konfigürasyonda olan ve ticari olarak temin edilebilen 50 adet kristal silisyum tabanlı modülün (çok:mc-Si ve tek:m-Si) R_{S0REF} değerleri, tez çalışmasında türetilen yeni bağıntı ile hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler, mevcut çalışmalarda yaygın olarak kullanılan sayısallaştırma tekniği ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır, (Çizelge 5.4.) (Adamo vd., 2009; Chouder vd., 2012; Hadj Arab vd., 2004; Lineykin vd., 2014; Lo Brano vd., 2012).

Çizelge 5.4. R_{S0REF} değerlerinin hesaplanması

Parametre	Yeni bağıntı	Mevcut Yöntem
R_{S0REF}	$\frac{V_{OCREF} - V_{MREF}}{2I_{MREF}}$	Modül kataloglarında sunulan resim biçimindeki I-V eğrilerinin sayısallaştırılması.

R_{S0REF} değerlerini, Çizelge 5.4.'te belirtilen şekilde hesaplayabilmek için gerekli olan referans şartlarındaki elektriksel parametreler (I_{MREF} , V_{OCREF} , V_{MREF}) ve resim biçimindeki I-V eğrileri modül kataloglarından alınmıştır. 50 adet modülün katalogları internet yolu ile elde edilmiştir. Yeni bağıntının yardımı ile bu modüllerin R_{S0REF} değerlerini hesaplayabilmek için gerekli olan materyal Ek E.'de belirtilmiştir.

Yeni bağıntı ve mevcut yöntem için hesaplanan R_{S0REF} değerleri Şekil 5.1.'de çizdirilmiştir. Çizdirilen veri noktalarına doğrusal bir fonksiyon uydurulmuştur.



Şekil 5.1. Yeni bağıntı ve mevcut yöntem için elde edilen R_{S0REF} değerlerinin karşılaştırılması

Uydurulan doğrunun eğimi ve R^2 değeri, 1,01 ve 0,9816 olarak hesaplanmıştır. R^2 değerinin 1'e yakın olması uydurulan doğrusal fonksiyonun, veri noktaları ile olan güçlü/iyi uyumunu ifade etmektedir. Hesaplanan eğim değerinin 1'e yakın olması ise, R_{S0REF} değerini hesaplamak için bu tez çalışmasında türetilen yeni bağıntı ile mevcut yöntem arasındaki uyumu göstermektedir. Bir başka ifadeyle kristal tabanlı Si modüllerin R_{S0REF} değerlerini hesaplamak için, mevcut yöntem yerine yeni bağıntının kullanılabileceğidir.

Model parametrelerini elde edebilmek için gerekli olan başlangıç değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanması oldukça önemlidir. Klasik analitik yöntemler başlangıç değerlerini hesaplayabilmek için ölçülmüş I-V eğrisine ihtiyaç duymaktadırlar (Chan ve Phangd, 1987; Hadj Arab vd., 2004; Phang vd., 1984). Ölçüm ekipmanlarının yüksek maliyeti ve ölçüm süreleri dikkate alındığında, kataloglarda resim biçiminde verilmiş I-V eğrilerinin sayısallaştırılması tekniği daha pratiktir. Buna rağmen bu yöntemde temel olarak 2 sorun karşımıza çıkmaktadır. İlk olarak, sayısallaştırılmış I-V eğrilerinden elde edilen referans parametreler ile kataloglarda sayısal değer olarak sunulan referans parametrelerinin örtüşmediği, tutarsızlık gösterdiği rapor edilmiştir (Averbukh vd., 2012; Orioli ve Di Gangi, 2013). İkinci olarak ise, ticari olarak temin edilebilen birçok modülün teknik kataloğunda, resim biçimindeki I-V eğrileri yer almamaktadır (Paulescu vd., 2014). Bu durumda, bu yöntemi kullanarak ilgili başlangıç değerlerini hesaplamak mümkün değildir. Örneğin, bu tez çalışmasında

kullanılan test modülünün teknik kataloğunda, resim biçimindeki I-V eğrileri kullanıcıya sunulmamıştır (Ek A. test modülünün teknik kataloğu). Belirli yöntemlerde ise, seri direnç başlangıç değerleri kullanıcı tahminlerinden, analitik veya ampirik ifadelerden belirlenmektedir (Can ve Ickilli, 2013; Ciulla vd., 2014; de Blas vd., 2002; Orioli ve Di Gangi, 2013). Ancak bu başlangıç değerleri, gerçek R_{S0REF} değerinden uzaktırlar. Bundan dolayı bu tür yöntemler, modül performansını tanımlayan en olası model parametrelerini hesaplayabilmek için iterasyon tekniklerine ihtiyaç duymaktadırlar.

Bu tez çalışmasında, sadece elektriksel parametreler kullanılarak elde edilen R_{S0REF} ve R_{SH0REF} değerlerinin yardımı ile Şekil 4.6.'da anlatılan hesaplama adımlarına uygun olarak, test modülün referans şartlarındaki model parametreleri hesaplanmış ve Çizelge 5.5.'te belirtilmiştir.

Çizelge 5.5. Yeni yöntem kullanılarak test modülü için hesaplanan referans şartlarındaki model parametreleri

A	$R_{SREF} (\Omega)$	$R_{SHREF} (\Omega)$	$I_{LREF} (A)$	$I_{0REF} (A)$
38,4	0,162	125,2	6,045	$1,740 \times 10^{-9}$

Model parametrelerini hesaplamak için kullanılan mevcut yöntemler incelendiğinde, seçilen yönteme göre model parametrelerinin farklı değerler aldıkları tespit edilmiştir (Lun vd., 2013; Siddiqui vd., 2013; Tossa vd., 2014). Esasında model parametrelerinin gerçek değerlerini bilmek mümkün değildir. Bu yüzden, farklı yöntemler kullanılarak elde edilen model parametrelerinin doğrulukları ya da geçerliliklerine karar verecek gerçek parametre değerleri yoktur. Bunun yerine, her bir yöntemden elde edilen model parametrelerinin yardımı ile modül performansı simüle edilerek, ölçülen modül performansı ile karşılaştırılmalıdır. Bu karşılaştırma sonucunda elde edilen hata değeri belirli bir düzeyin altında ise, belirlenen yöntemden hesaplanan model parametrelerinin geçerlilikleri kabul edilmiş olur. Bu tez çalışmasında referans model parametrelerini hesaplamak için ortaya konan yeni yöntemin geçerliliğine bir sonraki bölümde karar verilecektir.

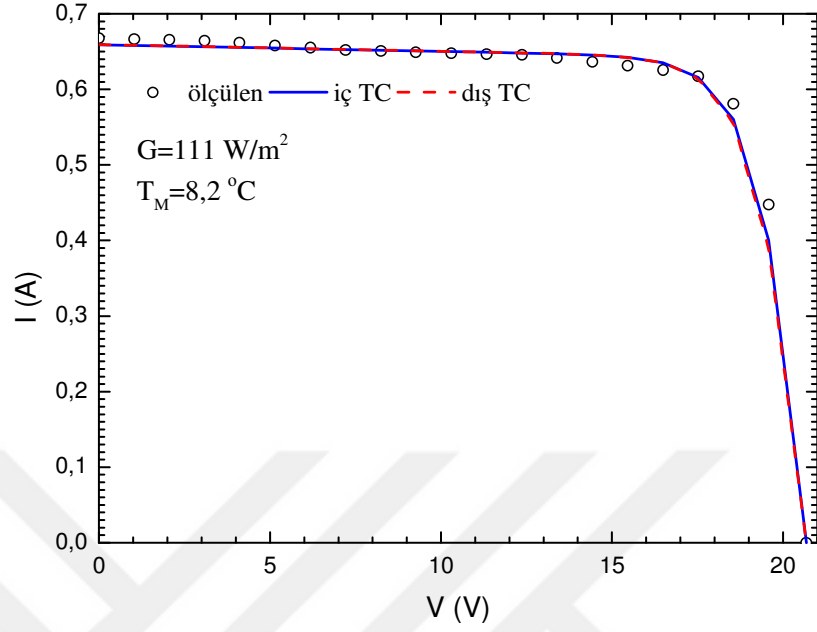
5.3. İç ve Dış Sıcaklık Katsayılarının Modül Performansına Etkisi ve Model Performansını Hesaplamak İçin Yeni Yöntemin İrdelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, yeni yöntemin modül performansını hesaplayabilme doğruluğu irdelenmiştir. Bunun yanında, yeni yöntemin yardımı ile iç ve dış sıcaklık katsayılarının modül performansına olan etkisi deayrıca incelenmiştir. Bu amaçla test modülünün; farklı çalışma şartları (G :ışınım ve T_M : modül sıcaklığı) için ölçülen I-V eğrileri, farklı günler için ölçülen maksimum çıkış gücü (P_M), verimlilik (η) ve enerji çıktısı (E) değerleri; iç ve dış sıcaklık katsayıları (TC) için simülasyonu gerçekleştirilen (hesaplanan) değerler ile karşılaştırılmıştır.

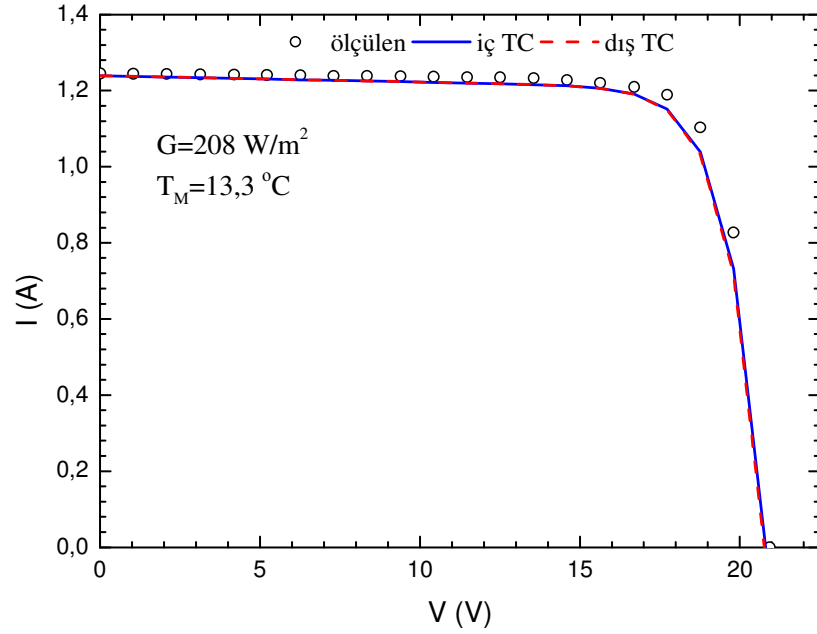
Yeni yöntemin I-V eğrilerini simüle edebilme kabiliyetini ortaya koymak amacı ile Ocak 2015-Aralık 2015 arasındaki ölçüm döneminden, belirlenen bir gün için, G ve T_M değerleri ile belirlenen farklı çalışma şartlarında ölçülen 11 adet I-V eğrisi seçilmiştir. Bu şartlar (Çizelge 5.6.) kullanılarak, iç ve dış sıcaklık katsayıları için I-V eğrilerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Ölçülen ve simüle edilen I-V eğrileri bir grafik programının yardımı ile üst üste çizdirilmiş ve Şekil 5.2.-Şekil 5.12.'de gösterilmiştir. Her şekil üzerinde I-V eğrilerini simüle edebilmek için gerekli olan G ve T_M değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 5.6. I-V eğrilerinin simülasyonu için gerekli olan çalışma şartları

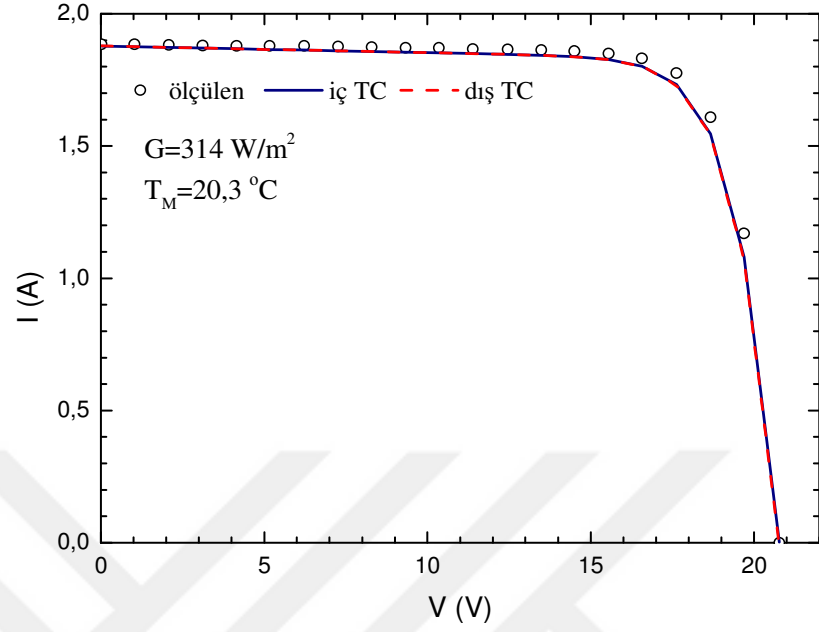
Ölçüm numarası	G (W/m ²)	T_M (°C)
1	111	8,2
2	208	13,3
3	314	20,3
4	402	28,5
5	517	35,5
6	604	40,0
7	714	45,3
8	815	49,9
9	909	54,5
10	999	52,9
11	1044	55,2



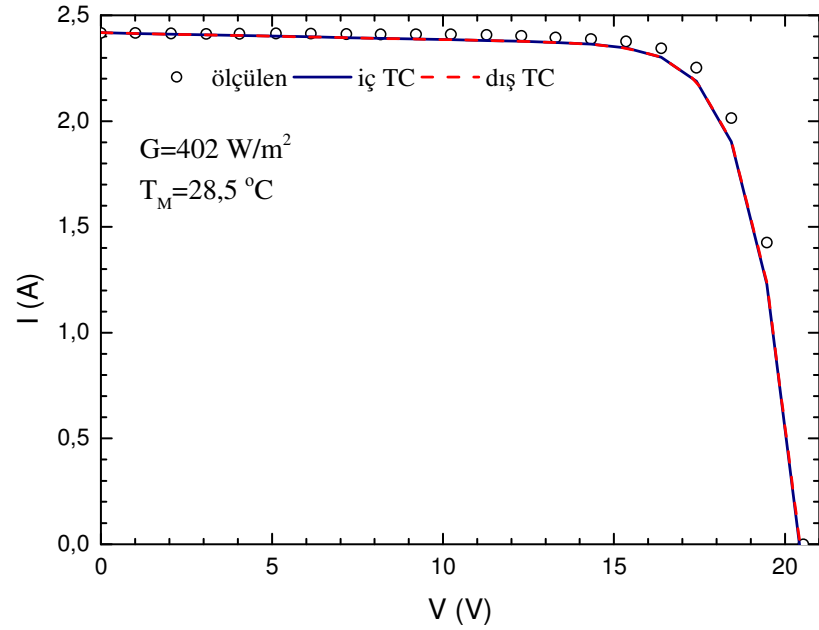
Şekil 5.2. $G=111 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=8,2 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



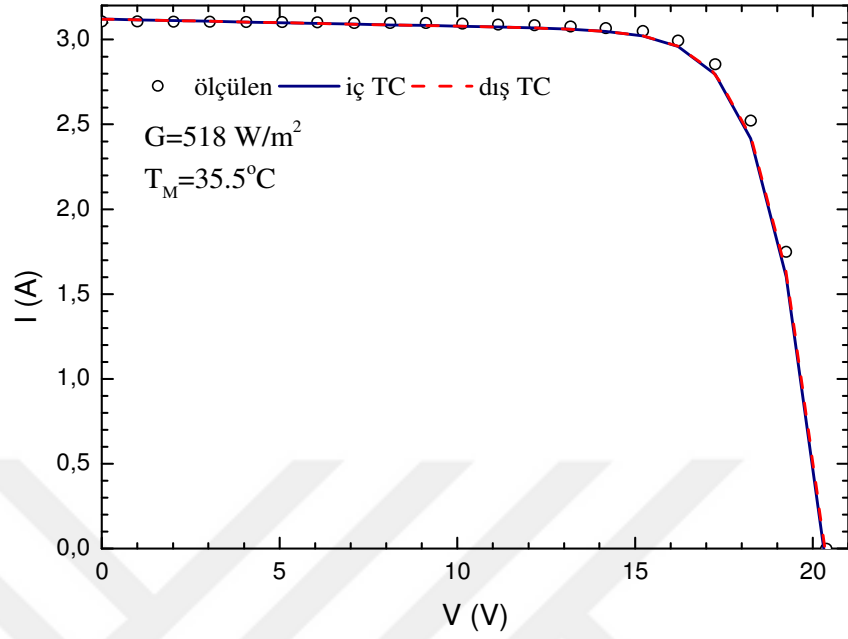
Şekil 5.3. $G=208 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=13,3 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



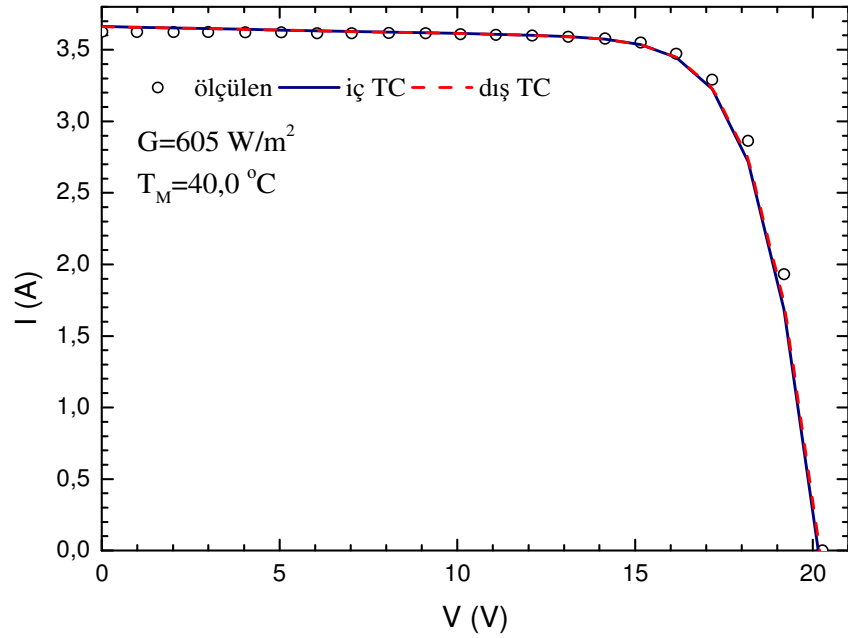
Şekil 5.4. $G=314 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=20,3 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



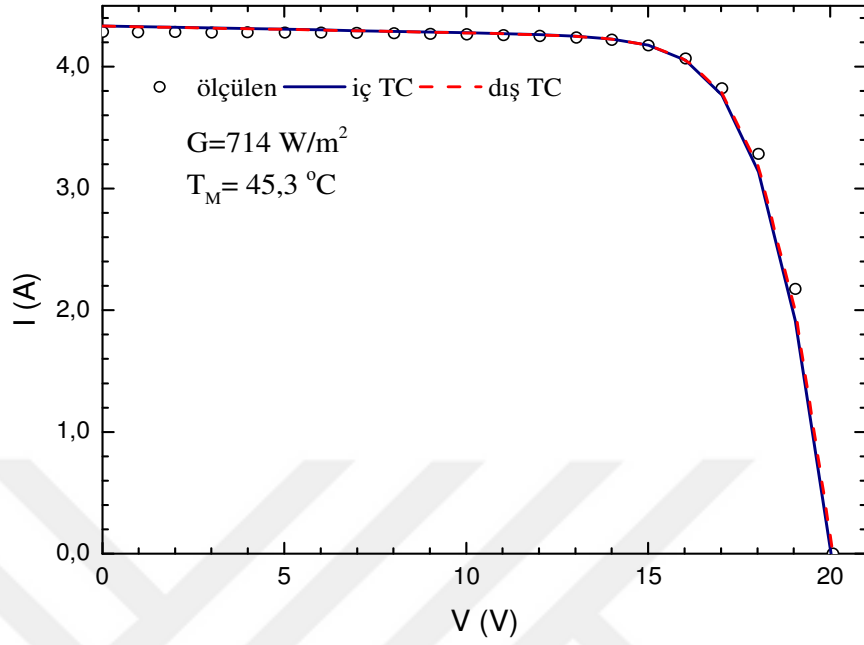
Şekil 5.5. $G=402 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=28,5 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



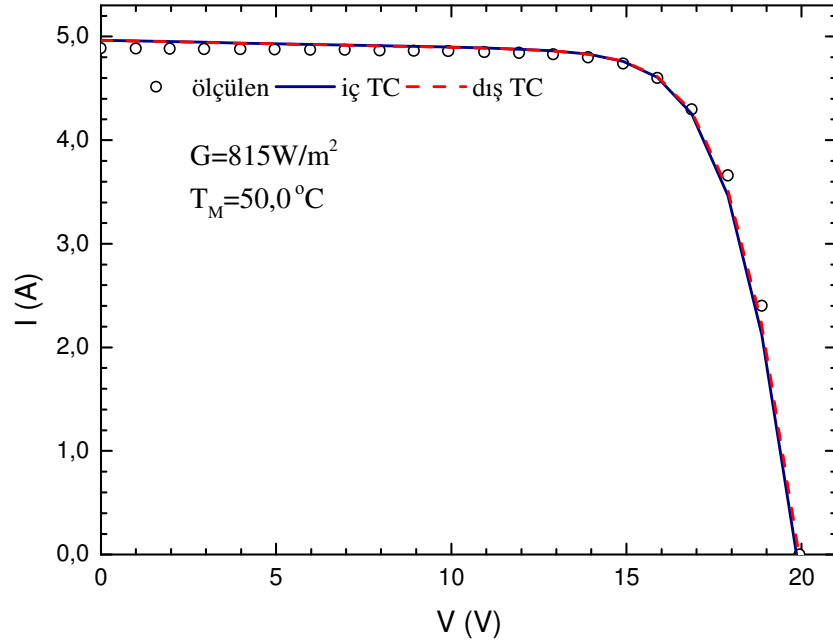
Şekil 5.6. $G=518 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=35,5^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



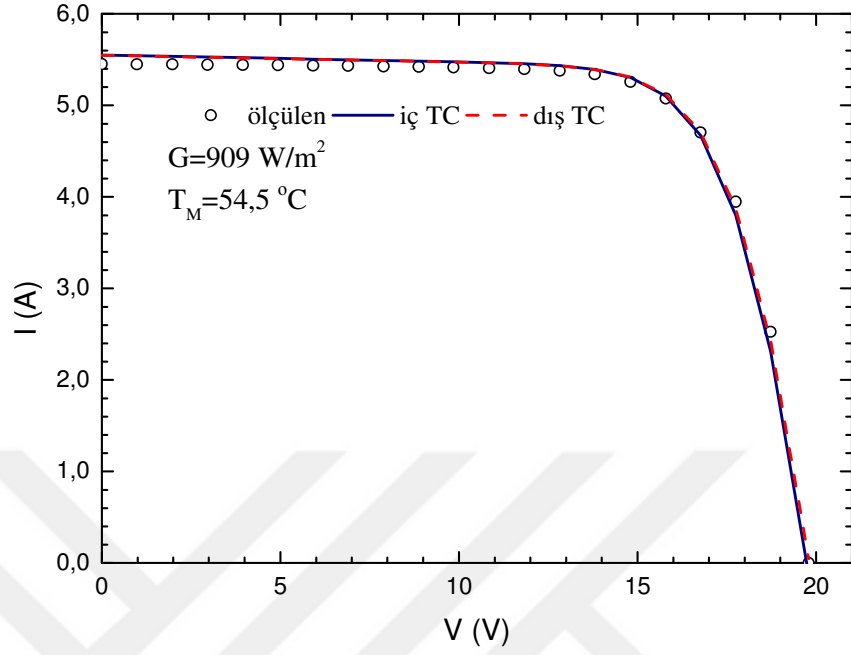
Şekil 5.7. $G=605 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=40,0^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



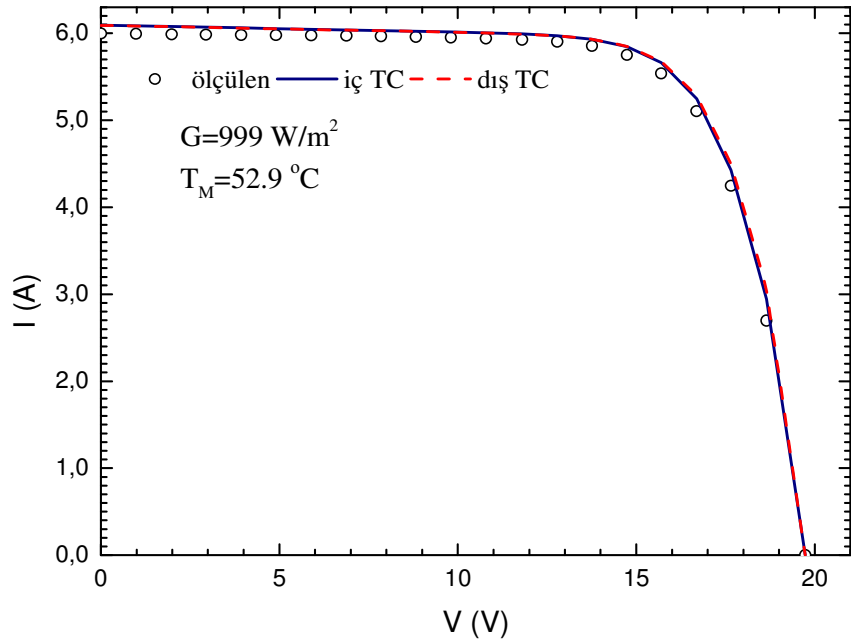
Şekil 5.8. $G=714 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=45,3 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



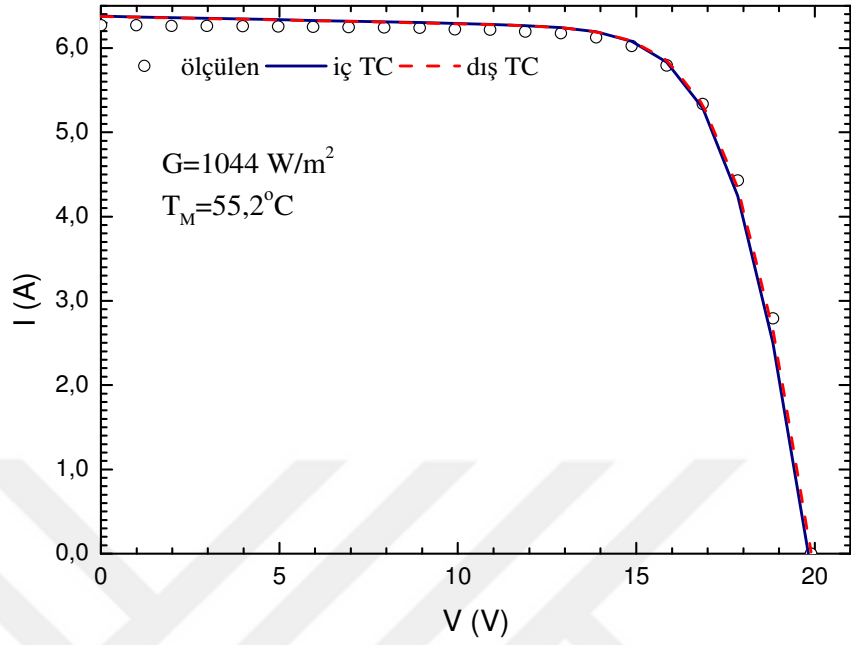
Şekil 5.9. $G=815 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=49,9 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



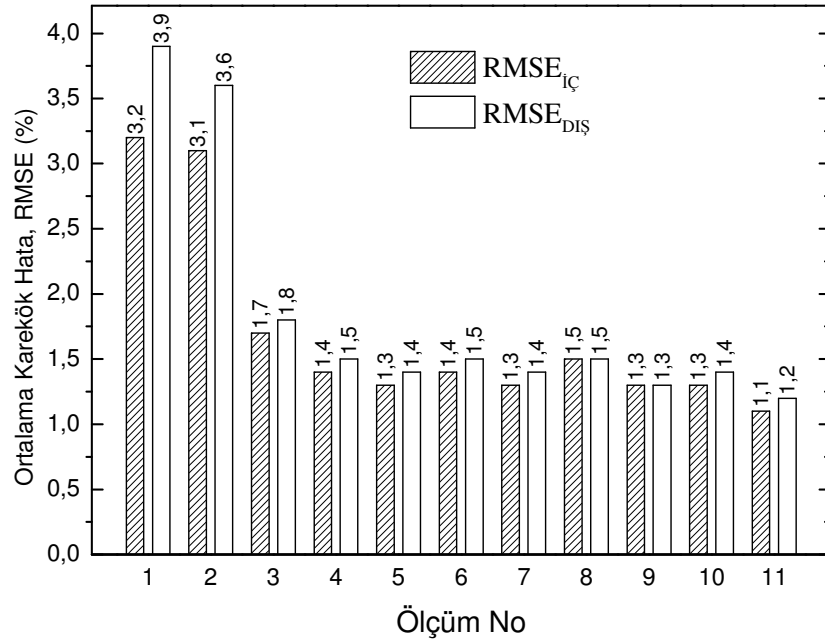
Şekil 5.10. $G=909 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=54,5 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



Şekil 5.11. $G=999 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=52,9 \text{ }^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



Şekil 5.12. $G=1044 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=55,2^\circ\text{C}$ şartlarında ölçülen ve bu şartlar için simülasyonu gerçekleştirilen akım-gerilim (I-V) eğrileri



Şekil 5.13. İç ve dış sıcaklık katsayıları kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilen I-V eğrileri için hesaplanan hata değerleri

Ölçülen ile iç ve dış sıcaklık katsayıları için simülasyonu gerçekleştirilen I-V eğrileri arasındaki uyumu ifade eden hata değerleri (RMSE) hesaplanarak, Çizelge 5.6.'da belirtilen ölçüm numarasına karşı çizdirilmiş ve grafiksel olarak Şekil 5.13.'te gösterilmiştir. İç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanan hata değerleri $RMSE_{iç}$ ve $RMSE_{dış}$ ile ifade edilmiştir.

İç ve dış sıcaklık katsayıları kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilen I-V eğrilerinden hesaplanan büyük hata değerleri %3,2 ve %3,9 olup, çalışma koşullarının $G=111 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=8,2 \text{ }^\circ\text{C}$ olduğu 1 numaralı ölçüm için elde edilmiştir. Çalışma koşullarının $G=208 \text{ W/m}^2$ ve $T_M=13,3^\circ\text{C}$ olduğu 2 numaralı ölçümde elde edilen hata değerleri de yaklaşık olarak 1 numaralı ölçümdeki hata değerleri ile aynı olduğu görülmektedir (Şekil 5.13.). Bu ölçümde, iç ve dış sıcaklık katsayıları için elde edilen hata değerleri %3,1 ve %3,6'dır. Tek diyot modelinin, 200 W/m^2 ve daha düşük ısıtım değerlerinde I-V eğrisini simüle edebilme doğruluğunun zayıf olduğu bildirilmiştir (Ding vd., 2014; Elbaset vd., 2014; Hejri vd., 2014). Bundan başka, kristal silisyum tabanlı modüllere ait iç veya dış sıcaklık katsayılarının hesaplandıkları ısıtım değerinin $\pm\%30$ aralığında geçerli olabilecekleri vurgulanmıştır (Siddiqui vd., 2014). Dolayısıyla bu ölçütlere göre kabul edilen ($G < 700 \text{ W/m}^2$) ısıtım değerlerinde, iç ve dış sıcaklık katsayıları, simülasyonu gerçekleştirilen I-V eğrilerinde belirli bir hataya neden olabilmektedir. Bu iki etkinin varlığında, özellikle 200 W/m^2 ve daha düşük ısıtım değerlerinde elde edilen hata değerlerinin, diğer ısıtım değerleri için elde edilen hata değerlerine göre yüksek çıkmasının nedeni olarak gösterilebilir. Simülasyonu gerçekleştirilen I-V eğrileri için standart bir hata aralığı bildirilmemiştir. Buna rağmen, daha önce bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde elde edilen hata değerleri kabul edilebilir düzeydedir ($\%3,9 < \%5,0$) (Humada vd., 2016; Miceli vd., 2015; Peng vd., 2014; Siddiqui vd., 2013).

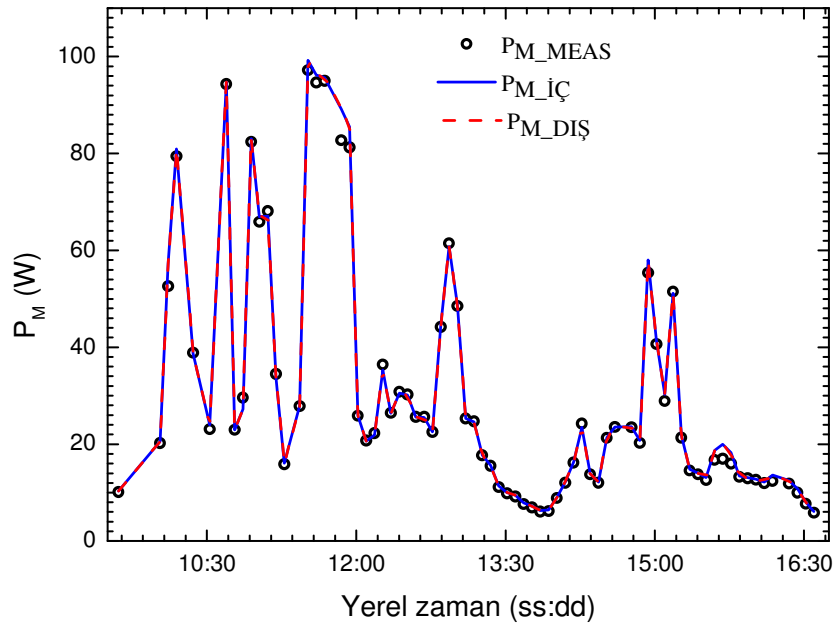
Yeni yöntemin maksimum çıkış gücünü, verimliliği ve üretilen enerji çıktısını hesaplayabilme kabiliyetini ortaya koymak ve sıcaklık katsayılarının (iç ve dış) elektriksel performansa olan etkisini incelemek amacıyla, Ocak 2015-Aralık 2015 arasındaki ölçüm döneminden, mevsimleri temsilen dört ay (Şubat, Nisan, Haziran ve Eylül), her ayı temsilen de farklı ısıtım profiline sahip bir gün belirlenmiştir. Bu günler ve sahip oldukları ısıtım profilleri Çizelge 5.7.'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.7. Seçilen günler ve bu günlere ait ışıınım profilleri

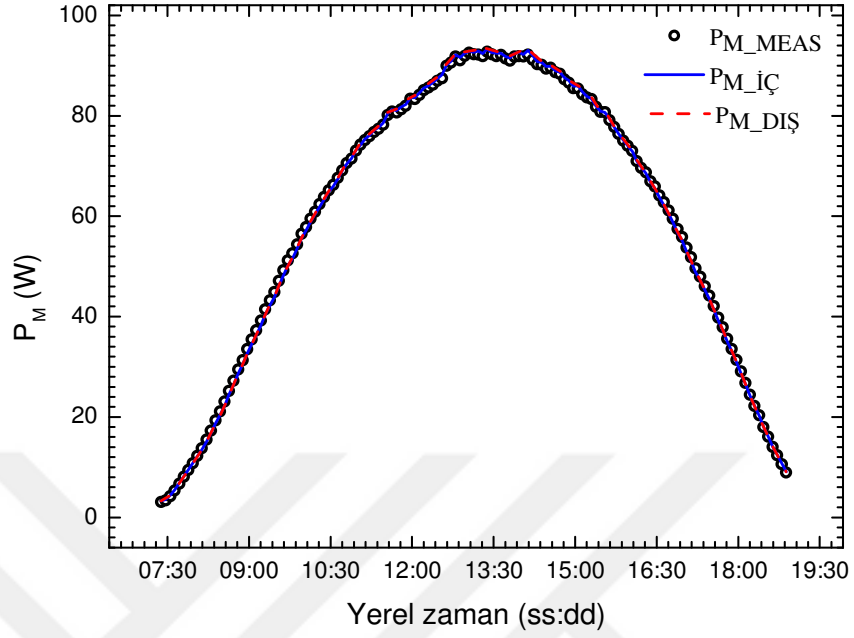
Ölçüm Tarihi	İşınım Profili
09 Şubat 2015	Kapalı
17 Nisan 2015	Açık
29 Haziran 2015	Parçalı Bulutlu
19 Eylül 2015	Parçalı Bulutlu

Seçilen günler için, ölçülen ve simülasyonu gerçekleştirilen (iç ve dış sıcaklık katsayıları için) I-V eğrilerinden; maksimum çıkış gücü (P_M), verimlilik (η) ve enerji çıktısı (E) değerleri hesaplanmıştır. Bu günler için ölçülen ışıınım (G), modül sıcaklığı (T_M) ve çevre sıcaklığı (T_C) değerleri Ek F.'de verilmiştir.

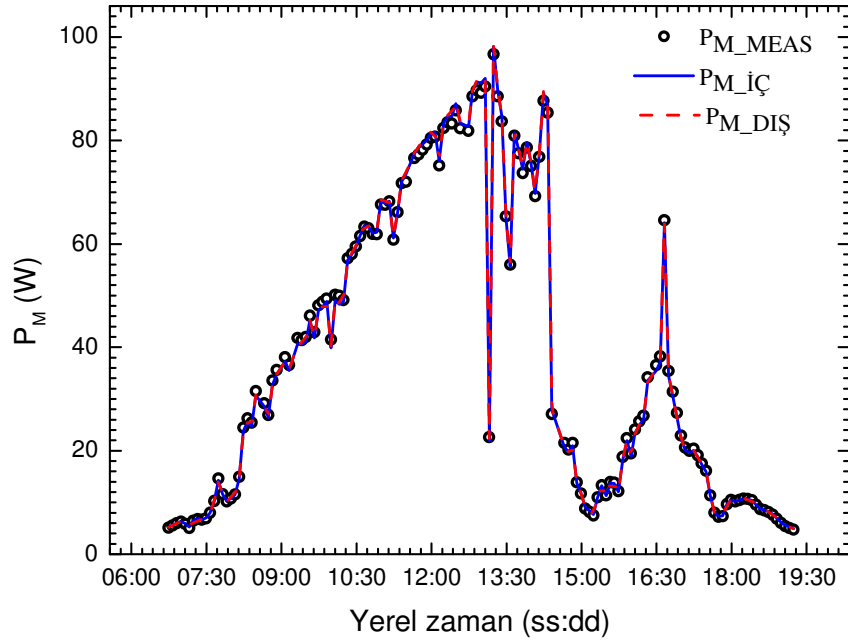
Bu günler için ölçülen (P_{M_MEAS}) ve hesaplanan ($P_{M_İÇ}$ ve $P_{M_DIŞ}$) maksimum çıkış gücü değerleri ölçüm zamanına karşı çizdirilmiş ve Şekil 5.14.-5.17.'de gösterilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan maksimum çıkış gücü değerleri arasındaki uyumu ifade eden hata değerleri (RMSE) hesaplanmış ve Şekil 5.18.'de grafiksel olarak gösterilmiştir. İç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanan hata değerleri, $RMSE_{İÇ}$ ve $RMSE_{DIŞ}$ ile ifade edilmiştir.



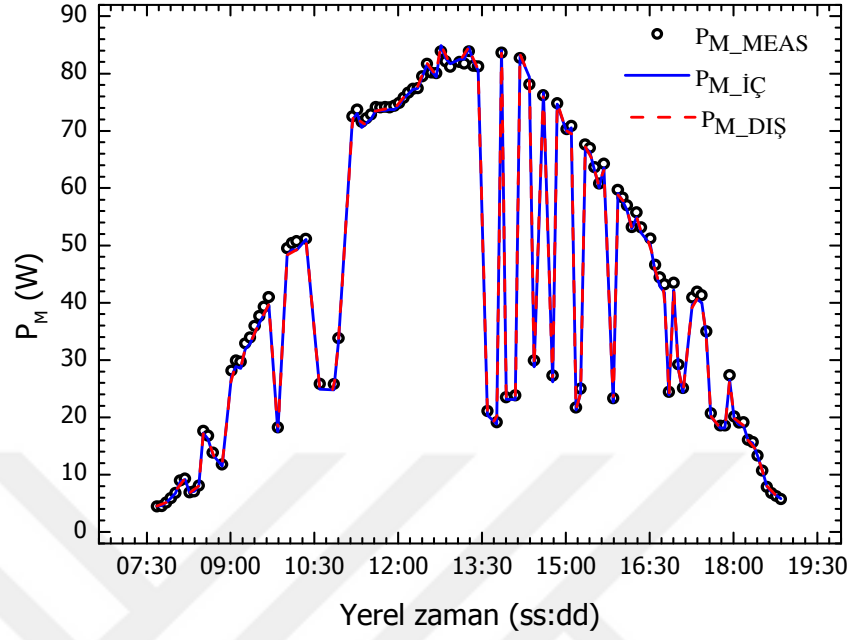
Şekil 5.14. Ölçülen (P_{M_MEAS}) ve hesaplanan ($P_{M_İÇ}$ ve $P_{M_DIŞ}$) maksimum çıkış gücü değerleri (09 Şubat 2015)



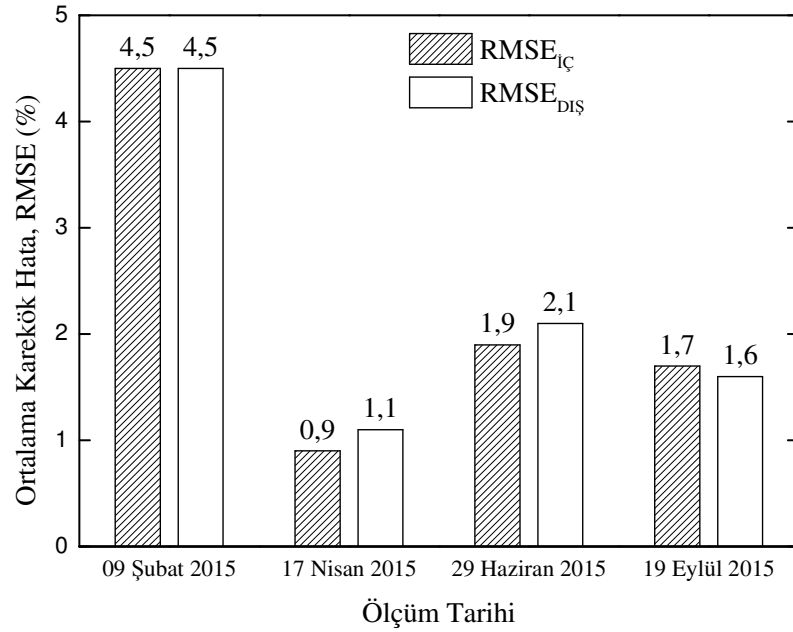
Şekil 5.15. Ölçülen (P_{M_MEAS}) ve hesaplanan ($P_{M_iÇ}$ ve $P_{M_DIŞ}$) maksimum çıkış gücü değerleri (17 Nisan 2015)



Şekil 5.16. Ölçülen (P_{M_MEAS}) ve hesaplanan ($P_{M_iÇ}$ ve $P_{M_DIŞ}$) maksimum çıkış gücü değerleri (29 Haziran 2015)



Şekil 5.17. Ölçülen (P_{M_MEAS}) ve hesaplanan ($P_{M_IÇ}$ ve $P_{M_DİŞ}$) maksimum çıkış gücü değerleri (19 Eylül 2015)



Şekil 5.18. İç ve dış sıcaklık katsayıları kullanılarak elde edilen maksimum çıkış güçleri için hesaplanan hata değerleri

İç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanan maksimum çıkış gücündeki en büyük hata değeri 09 Şubat 2015 tarihinde olup, bu değer %4,5'tir (Şekil 5.18.). Test modülünün teknik kataloğunda, maksimum çıkış gücü için belirtilen hata değeri %5'tir. Daha önce bu alanda yapılan çalışmalara incelendiğinde ise bu hata değerinin $\pm\%10$ aralığında olabileceği bildirilmiştir (Cipriani vd., 2014; Orioli ve Di Gangi, 2013). Buna göre, Çizelge 5.18.'deki hata değerleri bu aralığın altında kalmaktadır.

Seçilen günlerdeki enerji çıktısı değerleri (E_{MEAS} , $E_{İÇ}$ ve $E_{DİŞ}$), eşitlik (4.26)'ya uygun olarak, Şekil 5.14.-Şekil 5.17.'den hesaplanmış ve Çizelge 5.8.'de gösterilmiştir. Burada E_{MEAS} , $E_{İÇ}$ ve $E_{DİŞ}$; ölçülen, iç sıcaklık katsayısı ve dış sıcaklık katsayısı için hesaplanan enerji çıktısı değerlerine karşılık gelmektedir.

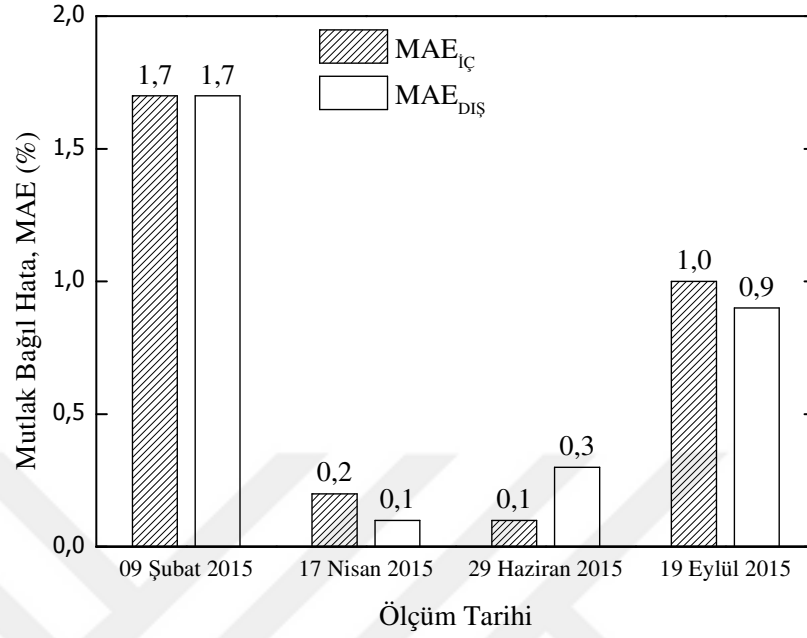
Çizelge 5.8. Ölçülen ve hesaplanan enerji çıktısı değerleri

Ölçüm Tarihi	$E_{MEAS}(Wh)$	$E_{İÇ}(Wh)$	$E_{DİŞ}(Wh)$
09 Şubat 2015	211,7	215,4	215,4
17 Nisan 2015	678,7	677,6	679,5
29 Haziran 2015	472,9	472,8	474,1
19 Eylül 2015	483,4	478,7	479,2

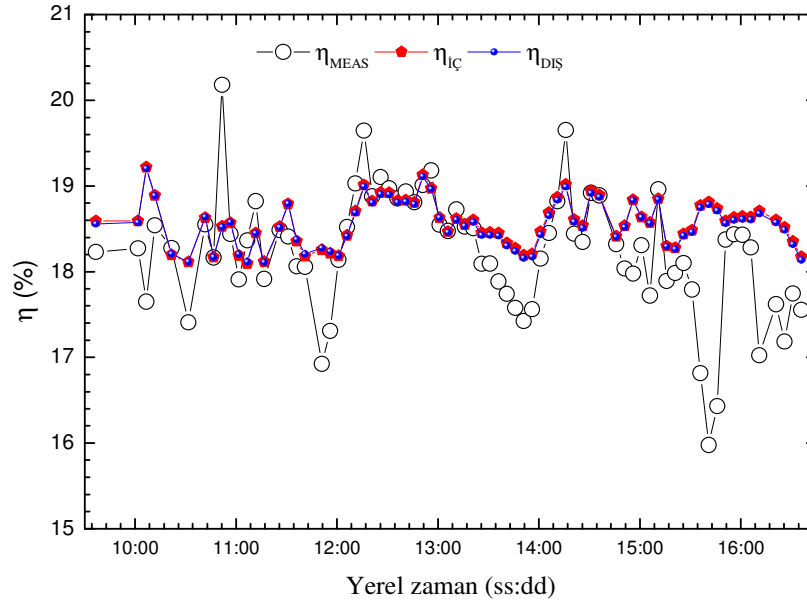
Elde edilen enerji çıktısı ($E_{İÇ}$ ve $E_{DİŞ}$) değerleri için, mutlak bağıl hata (MAE) değerleri hesaplanmış ve ölçüm tarihine karşı çizdirilerek grafiksel olarak Şekil 5.19.'da gösterilmiştir. İç ve dış sıcaklık katsayıları hesaplanan hata değerleri sırası ile $MAE_{İÇ}$ ve $MAE_{DİŞ}$ ile ifade edilmiştir.

Enerji çıktısı ($E_{İÇ}$ ve $E_{DİŞ}$) değerleri için elde edilen en büyük hata değeri 09 Şubat 2015 tarihinde olup, bu değer %1,7'dir (Şekil 5.19.). Fotovoltaik modüllerin enerji çıktıları için bildirilen en büyük hata değerleri dikkate alındığında (%2,8-%4,0), hesaplanan hata değerlerinin kabul edilebilir düzeyde oldukları Şekil 5.19.'dan anlaşılmaktadır (Meyer ve van Dyk, 2000; Thevenard ve Pelland, 2013).

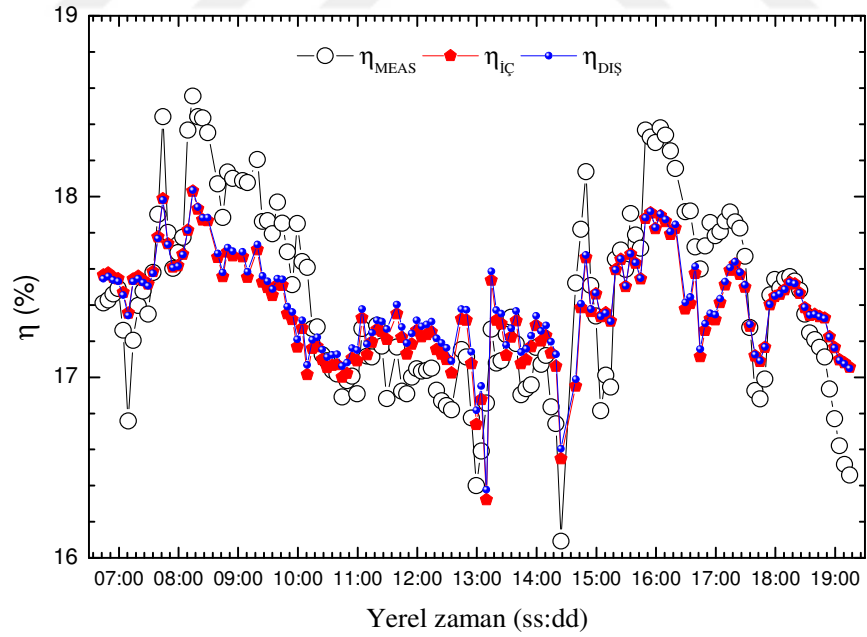
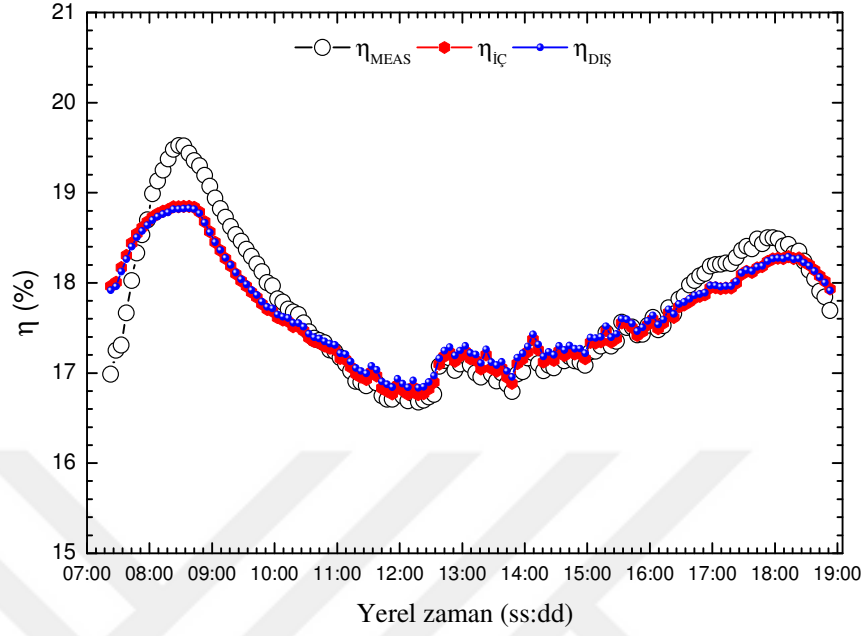
Aynı günler için, ölçülen ve hesaplanan verimlilik değerleri (η_{MEAS} , $\eta_{İÇ}$ ve $\eta_{DİŞ}$), ölçüm zamanına karşı çizdirilerek Şekil 5.20.-Şekil 5.23.'te gösterilmiştir.

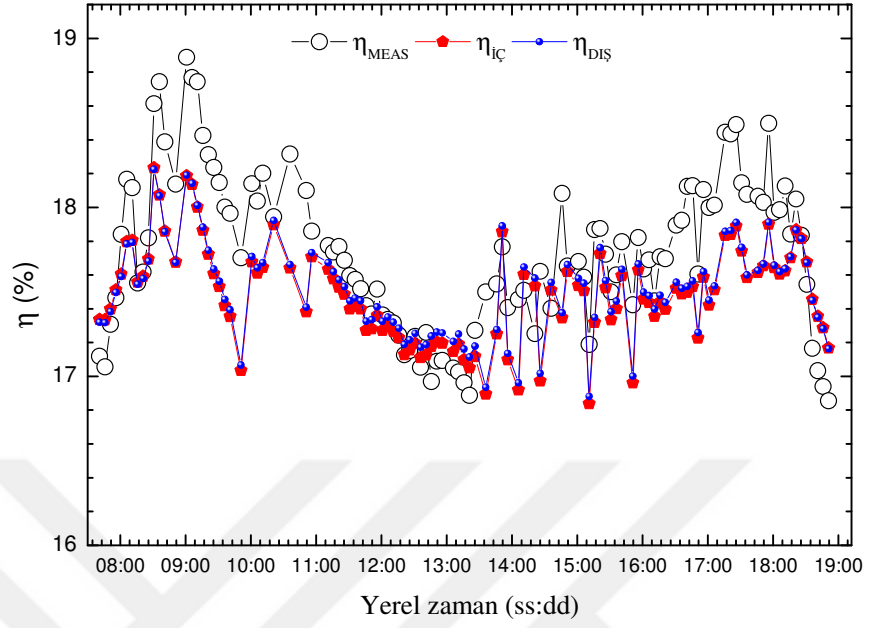


Şekil 5.19. İç ve dış sıcaklık katsayıları kullanılarak elde edilen enerji çıktısı değerleri için hesaplanan hata değerleri

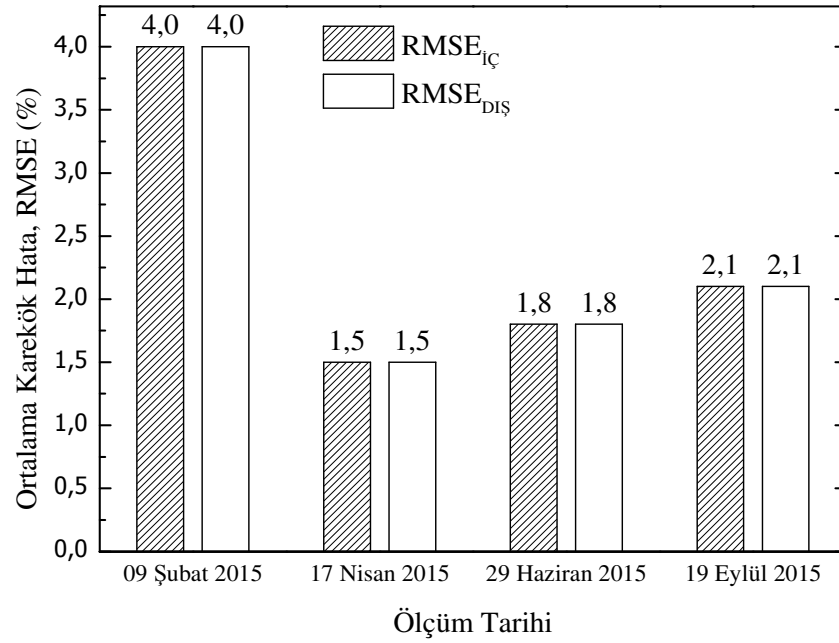


Şekil 5.20. Ölçülen ve hesaplanan verimlilik değerleri (09 Şubat 2015)





Şekil 5.23. Ölçülen ve hesaplanan verimlilik değerleri (19 Eylül 2015)



Şekil 5.24. İç ve dış sıcaklık katsayıları kullanılarak elde edilen verimlilik değerleri için hesaplanan hata değerleri

Ölçülen (η_{MEAS}) ve hesaplanan ($\eta_{İÇ}$ ve $\eta_{DİŞ}$) verimlilik değerleri arasındaki uyumu ifade eden hata değerleri (RMSE) hesaplanmış ve Şekil 5.24.'te grafiksel olarak belirtilmiştir. İç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanan hata değerleri, $RMSE_{İÇ}$ ve $RMSE_{DİŞ}$ ile ifade edilmiştir.

Hesaplanan verimlilik ($\eta_{İÇ}$ ve $\eta_{DİŞ}$) değerleri için elde edilen en büyük hata değeri 09 Şubat 2015 olup, bu değer %4,0'tür. Mevcut çalışmalar tarandığında, hesaplanan verimlilik değeri ile ilgili standart bir hata değerinin rapor edilmediği tespit edilmiştir.

Hesaplanan parametrelerde (P_M , η ve E) en büyük hata değerlerinin 09 Şubat 2015 tarihindeki ölçüm için olduğu tespit edilmiştir. Bu parametreler, simülasyonu gerçekleştirilen I-V eğrilerinden, bu I-V eğrileri de tek diyot eşdeğer devre modelinden hesaplanmıştır (simüle edilmiştir). İlaveten, simülasyonu gerçekleştirmek için kullanılan iç ve dış sıcaklık katsayıları, ölçüldükleri ışıyım değerinin $\pm\%30$ aralığında geçerlidirler. Daha önce de belirtildiği gibi, sıcaklık katsayılarının ve tek diyot eşdeğer devre modelinin, düşük ışıyım olarak kabul edilen 200 W/m^2 ve altındaki ışıyım değerlerinde, geçerliliği veya doğruluğu azalmaktadır. 09 Şubat 2015, 17 Nisan 2015, 29 Haziran 2015 ve 19 Eylül 2015 tarihlerindeki düşük ışıyım değerlerinin ($G \leq 200 \text{ W/m}^2$), geriye kalan daha yüksek ışıyım değerlerine ($G > 200 \text{ W/m}^2$) olan oranı; %41, %13, %30 ve %22 olarak hesaplanmıştır. Bir başka ifade ile 09 Şubat 2015 tarihinde gün boyunca ölçülen ışıyım değerlerinden, %41'inin değeri 200 W/m^2 'nin altındadır. Bundan başka, ani ışıyım değişimlerinin meydana geldiği günlerde, fotovoltaiik modül ile piranometrenin farklı tepki zamanlarına sahip olmaları elde edilen hataların yüksek olmasının bir başka nedeni olarak da gösterebilir (Paulescu vd., 2014). Dolayısıyla, 09 Şubat 2015 tarihindeki simülasyon sonuçlarındaki hataların, diğer tarihlerdeki hatalara göre yüksek çıkması olası bir durumdur.

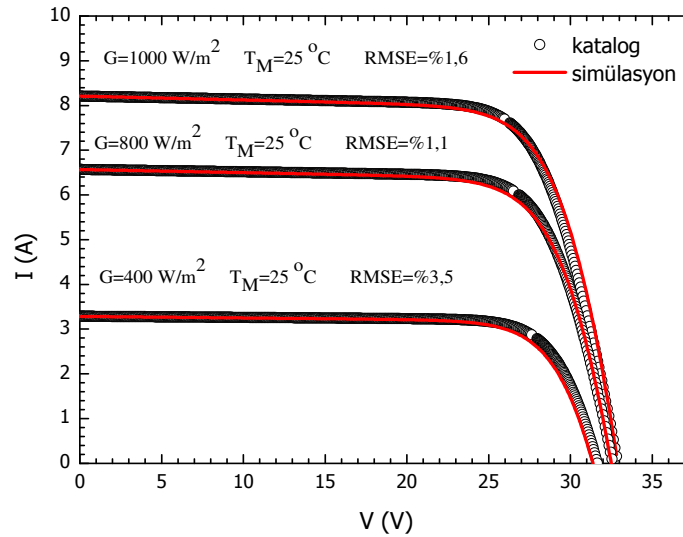
Bu tez çalışmasında modül performansının simülasyonunda kullanılan yeni yöntemin geçerliliği, deneysel olarak sadece tek kristal fotovoltaiik modül için incelenmesine rağmen, R_{S0REF} değerini hesaplamak için kullanılan yeni bağıntının (eşitlik (4.14)) geçerliği ise 50 adet farklı modül için test edilmiştir. Yeni yöntemin geçerliliğini çok kristalli silisyum modülde de incelemek amacıyla KC200GT marka fotovoltaiik modül seçilmiştir. Bu modülün seçilmesinin temel nedeni, mevcut çalışmalarda

yaygın olarak kullanılan bir test modülü olmasıdır (Cubas vd., 2014a; Lun vd., 2013; Shongwe ve Hanif, 2015; Yıldırım ve Tacer, 2016). Bu yeni test modülünün, kataloğunda sunulan belirli çalışma şartlarındaki I-V eğrileri, sayısallaştırmak suretiyle elde edilmiştir. İlk olarak yeni yöntem kullanılarak KC200GT modülü için referans model parametreleri hesaplanmıştır (Şekil 4.6.). Referans model parametrelerini hesaplayabilmek için gerekli olan katalog değerleri Çizelge 5.9.'da verilmiştir. Sonrasında aynı çalışma şartları için güncel model parametreleri hesaplanmış (Şekil 4.7.) ve I-V eğrilerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8.).

Çizelge 5.9. KC200GT modülünün katalog değerleri (Ek G.)

Parametre	Değer
N_s	54
$I_{SCREF}(A)$	8,21
$V_{OCREF}(V)$	32,90
$I_{MREF}(A)$	7,61
$V_{MREF}(V)$	26,30

Çalışma şartları, sayısallaştırılmış katalog ve simülasyonu gerçekleştirilmiş I-V eğrileri ile bu eğriler için hesaplanan hata değerleri Şekil 5.25.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.25. KC200GT fotovoltaik modülü için kataloglarda sunulan ve yeni yöntem kullanılarak elde edilen I-V eğrileri

KC200GT modülünün sabit modül sıcaklığında ($T_M=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve farklı ışınlamalar olan 1000 W/m^2 , 800 W/m^2 ve 400 W/m^2 değerleri için I-V eğrilerindeki hata değerleri, %1,6, %1,1 ve %3,6 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen hata değerleri, yeni yöntemin, çok kristalli Si fotovoltaik modüllerin I-V eğrilerinin simülasyonunda da kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Yeni yöntemin referans model parametrelerinin hesaplanmasında ve dolayısıyla modül performansının simülasyonunda sahip olduğu avantajları ortaya koyabilmek için, öncelikli olarak mevcut yöntemlerin referans model parametrelerini hesaplama süreçleri anlaşılmalıdır. Mevcut yöntemlerin model parametrelerini hesaplama süreçlerini 3 kısımda incelemek mümkündür; *ek bilgiler, kullanıcı tahminli değerleri ve iterasyon gerekliliği* (Jack vd., 2015; Rus-Casas vd., 2014).

Ek Bilgilerin Gerekliliği: Modül kataloglarında bulunmayan ya da kullanıcıya sayısal değer olarak sunulmayan bilgiler, "ek bilgi" olarak adlandırılır. Bu ek bilgiler, model parametrelerini ve/veya başlangıç değerlerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Birçok yöntem, model parametrelerini hesaplayabilmek için I-V eğrisinin tamamına ya da belirli kısımlarına ihtiyaç duymaktadır (Chouder vd., 2012; de Blas vd., 2002; Hadj Arab vd., 2004; Lo Brano vd., 2010). Klasik analitik yöntemlerde bu başlangıç değerleri, pahalı ölçüm ekipmanları gerektiren, iç veya dış ortamda ölçülen I-V eğrilerinden elde edilmektedir (Chan ve Phangd, 1987; Phang vd., 1984). Oysa son yıllarda geliştirilen yöntemler, bu değerleri elde edebilmek için, kataloglardaki I-V eğrilerini kullanılmaktadırlar. Modül katalogları tarandığında, ihtiyaç duyulan I-V eğrilerinin, sayısal değer olarak değil, resim biçiminde sunuldukları tespit edilmiştir. Gerekli bilgilerin resim biçimindeki I-V eğrilerinden elde edilebilmesi için sayısallaştırma veya grafik programlarına ihtiyaç duyulur; örneğin Enguage veya Un-Scan-it (Tossa vd., 2014). Buna rağmen, önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, sayısallaştırılmış I-V eğrilerinden elde edilen referans parametre değerleri ile katalogda verilen değerlerin örtüşmediği, tutarsızlık gösterdiği bildirilmiştir (Averbukh vd., 2012; Lineykin vd., 2014). Model parametrelerini hesaplamak için kullanılan diğer bazı yöntemler ise; hava kütlesi düzeltme çarpanına (De Soto vd., 2006), ısı düzeltme çarpanına (Orioli ve Di Gangi, 2013), elektriksel parametrelerin referans koşullarından farklı değerlerine (Lo Brano vd., 2012), iç ortam veya dış ortam ölçümlerine (Rus-Casas vd., 2014) ihtiyaç duymaktadır (Jack vd., 2015).

Sonuç olarak referans model parametrelerini hesaplayabilmek için gerekli olan ekbilgilerin çoğu (resim biçimindeki I-V eğrileri hariç) modül kataloglarında kullanıcıya sunulmamaktadır. Bazı modül katalogları incelendiğinde ise, resim biçimindeki I-V eğrilerinin bile kullanıcılara sunulmadığı tespit edilmiştir. Örneğin bu çalışmada incelenen test modülünün teknik kataloğunda I-V eğrisi yer almamaktadır (Ek A.).

İterasyon Gerekliliği: Bu değerlendirmede nümerik çözüm teknikleri, denklem çözücüler, eğri uydurma ve optimizasyon teknikleri iterasyon başlığı altında toplanmıştır. Birçok yöntemde referans model parametrelerini hesaplamak için iterasyon gereklidir (Alqahtani, 2012; Lineykin vd., 2014; Orioli ve Di Gangi, 2013; Sera vd., 2007). Bu tür yöntemlerde en sık karşılaşılan sorun; yanlış seçilen başlangıç değeri veya iterasyon algoritmasıdır (Jack vd., 2015). Bu durum, kullanılan iterasyon algoritmasının hata vermesine, hesaplama zamanının uzamasına veya iterasyon sonuçlarının iraksamasına neden olmaktadır (Kavasoglu vd., 2009; Lim vd., 2015). Sonuç olarak iterasyon yöntemleri, referans model parametrelerini hesaplamada başarısız olmaktadır (Jack vd., 2015).

Kullanıcı tahminli değerler: Literatürde rapor edilen birçok yöntem, model parametrelerini hesaplayabilmek için n , R_s , R_{SH} gibi model parametrelerine veya bu parametrelerin başlangıç değerlerine ihtiyaç duymaktadır (Jack vd., 2015; Sera vd., 2007; Siddiqui vd., 2013). Başlangıç parametreleri iki şekilde elde edilmektedir; *ek bilgiler* ve *kullanıcı tahminli değerler*. Kullanıcı tahminli değerleri elde edebilmek için, modül kataloglarında yer almayan parametrelerin (E_{GREF} , I_{0REF} , E_G ve κ) değerlerinin bilinmesi veya başlangıç değerlerini öngörebilmek için belirli bir uzmanlık seviyesinde olunması gerekmektedir (Celik ve Acikgoz, 2007; De Soto vd., 2006). Yanlış ön görülen veya hesaplanan başlangıç parametreleri, özellikle iterasyon yöntemlerinde, önemli hatalara neden olmaktadır (Jack vd., 2015). Örneğin, iterasyona dayalı çalışmalarda ve model parametrelerini kullanarak I-V eğrilerin simülasyonunda en çok kullanılan yöntem Newton-Raphson tekniğidir. Bunun nedeni, bu tekniğin sadece doğru seçilen başlangıç değerlerinde veya model parametrelerinde hızlıca yakınsamasıdır (Can ve Ickilli, 2013; Salih vd., 2012).

Referans model parametrelerini hesaplamak için kullanılan mevcut yöntemler ile yeni yöntemin karşılaştırılması Çizelge 5.10.'da belirtilen; *ek bilgilerin gerekliliği*,

iterasyon gerekliliği ve kullanıcı tahminli değerler değerlendirilmelerine göre yapılmıştır.

Çizelge 5.10. Referans model parametrelerini hesaplamak için gerekli olan bilgiler (Jack vd., 2015)*

Yöntem	Ek Bilgilerin Gerekliliği	İterasyonun Gerekliliği	Kullanıcı tahminli değerler
(Hadj Arab vd., 2004)	Açık devre ve kısa devre noktasındaki, I-V eğrisi bilinmeli;	HAYIR	HAYIR
(de Blas vd., 2002)	Açık devre ve kısa devre noktasındaki, I-V eğrisi bilinmeli;	Evet; R_S 'yi hesaplamak için	Evet; R_S
(Villalva vd., 2009)	HAYIR	Evet; R_S ve R_{SH} 'i hesaplamak için	Evet; n
(De Soto vd., 2006)	Spektral düzeltme çarpanı	Lineer olmayan denklem çözücü	Evet; I_L , I_0 , R_S , R_{SH} ve n
(Lo Brano vd., 2010)	I-V eğrisi bilinmeli. Farklı ısıtım ve sıcaklık için I-V eğrileri bilinmeli.	Evet; R_S ve n 'i hesaplamak için	Evet; R_S ve n
(Orioli ve Di Gangi, 2013)	K_p ısı düzeltme çarpanı	Evet; R_S 'yi hesaplamak için	R_S
(Sera vd., 2007)	HAYIR	Evet; R_S , R_{SH} ve n'i hesaplamak için	Evet (R_S , R_{SH} ve n)
(Alqahtani, 2012)	HAYIR	Evet; optimizasyon algoritması ile tüm parametrelerin hesaplanması için	Evet; I_L , I_0 , R_S , R_{SH} ve n
(Lineykin vd., 2014)	I-V eğrisi, eğri uydurma için	Evet; optimizasyon algoritması ile tüm parametrelerin hesaplanması için	Evet; n
(Chouder vd., 2012)	Açık devre ve kısa devre noktasındaki, I-V eğrisi bilinmeli;	HAYIR	HAYIR
(Siddiqui vd., 2013)	HAYIR	Evet; Nelder-Mead optimizasyon tekniği ile model parametrelerinin hesaplanması.	Evet; I_L , I_0 , R_S , R_{SH} ve n
(Siddiqui vd., 2013)	Düşük ısıtım değerlerindeki PM değerleri, I_M ve V_{Mn} sıcaklık katsayıları	Evet; Nelder-Mead ve ikincil bir optimizasyon tekniği ile model parametrelerinin hesaplanması.	Evet; I_L , I_0 , R_S , R_{SH} , m ve n
(Peng vd., 2013).	HAYIR	Evet; R_S , R_{SH} , n'i hesaplamak için	HAYIR
Yeni Yöntem	HAYIR	HAYIR	HAYIR

* Bu çizelgedeki bilgiler Jack ve arkadaşlarının (2015) çalışmasından alınmış olup, yeni yöntem çizelgenin son satırına eklenmiştir (Jack vd., 2015).

Yukarıda anlatılanların ışığında yeni yöntem, referans model parametrelerini hesaplamak için, ek bilgilere, iterasyon tekniklerine ve kullanıcı tarafından belirlenen değerlere ihtiyaç duymamaktadır.

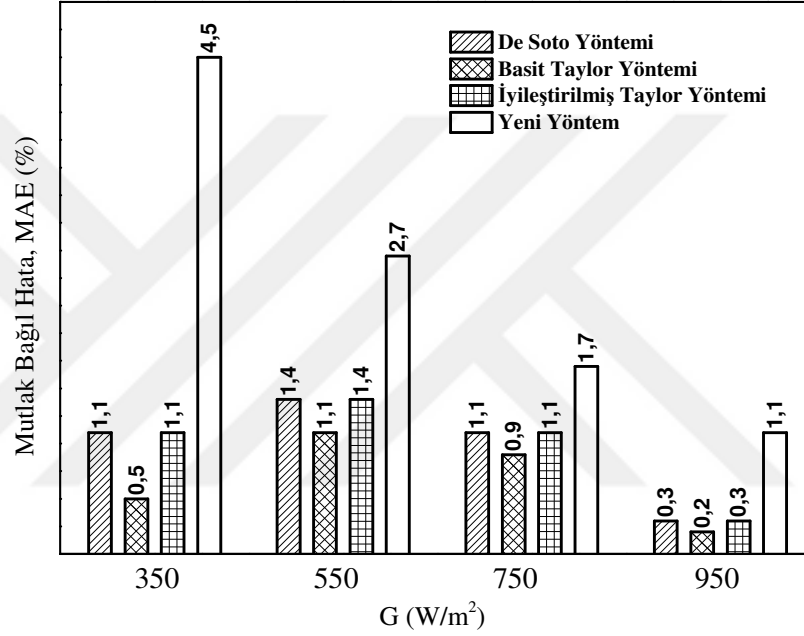
Referans model parametrelerinin hesaplanmasında ve modül performansının simülasyonunda kullanılacak olan yöntemin belirli özellikleri bir arada taşıması gerekmektedir. İyi bir yöntem, kabul edilebilir bir doğrulukta simülasyon sonuçlarını, basit hesaplamalarla elde edebilmeli ve uygulanabilir olmalıdır (Elbaset vd., 2014). Genellikle iterasyon ve analitik yöntemlerden elde edilen simülasyon veya hesaplama sonuçları, iyi bir doğruluğa sahiptir (Jack vd., 2015; Mahmoud vd., 2013; Sandrolini vd., 2010). Ancak iterasyon yöntemlerinin; sahip oldukları hesaplama yükü, hızlı hesaplama zamanı için özel yazılım gerekliliği ve bu yöntemleri uygulamak için kullanıcıda olması gereken belirli bilgi seviyesi gibi nedenlerden dolayı uygulanabilirlikleri düşüktür (Ma vd., 2014). Ayrıca bir yöntemde aşırı hesaplama yükü olması, o yöntemin iyi bir doğruluğa sahip olacağı anlamına gelmemektedir (Jiang vd., 2012). Analitik yöntemlerde ise en büyük sorun, pahalı ölçüm cihazlarına olan ihtiyaç ve dolayısıyla başlangıç parametrelerini elde etme sürecidir (Ma vd., 2014; Sandrolini vd., 2010). Bunun yanında, son yıllarda ortaya konan bazı analitik yöntemler, model parametrelerini hesaplayabilmek için denklem çözücülere, iterasyona dayalı nümerik tekniklere veya bu nümerik çözücülerin hazır olarak sunulduğu özel yazımlara (MATLAB, Mathematica, EES) ihtiyaç duymaktadırlar (de Soto vd., 2006; Lo Brano vd., 2012; Orioli ve Di Gangi, 2013; Yıldırım ve Tacer, 2016). İlâveten bazı analitik yöntemlerde yine fazla olan hesap yükünden söz etmek mümkündür (Cubas vd., 2014b; Deihimi vd., 2016; Lun vd., 2013). Mevcut çalışmalar tarandığında hala hangi yöntemin daha iyi olduğu ile ilgili kesin bir yargı bulunmamaktadır (Jena ve Ramana, 2015; Paulescu vd., 2014). Örneğin, hangi yöntemin daha iyi olduğuna karar verebilmek için tüm yöntemlerin aynı yazılımla kodlanıp, elde edilen sonuçlar ve hesaplama süreleri karşılaştırılmalıdır. Oysa, teknik açıdan bu imkansızdır. Bunun nedeni, yöntemlerle ilgili olan tüm detayların ve/veya belirli sabitlerin okuyucuya veya kullanıcıya verilmemesidir (Jack vd., 2015; Mahmoud vd., 2013; Paulescu vd., 2014). Son yıllarda, TRNSYS, PVsyst, INSEL ve PV F-Chart gibi hazır paket yazılımlar kullanılarak, model parametrelerinin hesaplanması ve modül veya örgülerin modellenmesi gerçekleştirilmektedir (Lalwani vd., 2010). Ancak, bu programları

kullanabilmek için belirli düzeyde teorik bilgiye ve satın alabilmek içinde belirli bir bütçeye ihtiyaç duyulmaktadır (Lalwani vd., 2010; Ma vd., 2014).

Mevcut yöntemlerin tamamına yakını araştırmacılar tarafından kolayca uygulanabilmektedir. Buna rağmen araştırmacıların dışında, sayıları günden güne artan fotovoltaiik tasarımcılar ve son kullanıcılar da fotovoltaiik piyasasındaki yerlerini almaktadırlar. Bu kullanıcı grubu, mevcut yöntemleri uygulamak için yeterli teorik bilgiye ve pratiğe sahip değildir (Cubas vd., 2014a; Ding vd., 2014; Jack vd., 2015; Massi Pavan vd., 2014). Dolayısıyla, gerek iterasyon gerekse de analitik yöntemler, yüksek simülasyon doğruluğuna sahip olmalarına rağmen, fotovoltaiik tasarımcılar ve son kullanıcılar açısından aşırı hesaplama yüküne ve düşük uygulanabilirliğe sahiptirler.

Örnek olması amacı ile Lun ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışma seçilmiştir (Lun vd., 2013). Adı geçen çalışmadaki maksimum çıkış gücü değerleri için elde edilen sonuçlar kullanılarak, yeni yöntemin doğruluğu, hesaplama yükü ve uygulanabilirliği irdelenmiştir. Lun ve arkadaşları, tek diyot eşdeğer devre modelinin genel ifadesini Taylor seri açılımı yaklaşımı altında çözerek; Basit Taylor ve İyileştirilmiş Taylor olmak üzere iki yöntem bildirmişlerdir. Adı geçen çalışmada, sabit modül sıcaklığı (25°C) ve farklı ışıınım değerleri için (350 W/m², 550 W/m², 750 W/m² ve 950 W/m²) bu iki yöntemden (Basit Taylor ve İyileştirilmiş Taylor) elde edilen sonuçlar ile aynı çalışma şartları için "de Soto" ve arkadaşlarının önerdiği yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (De Soto vd., 2006). Test modülü olarak ise çok kristalli silisyum KC200GT marka fotovoltaiik modül kullanılmıştır. Aynı çalışma şartları için maksimum çıkış gücü değerleri, yeni yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Modülün katalog değerleri baz alınarak, dört yöntem için (de Soto, Basit Taylor, İyileştirilmiş Taylor ve Yeni yöntem) mutlak bağıl hata değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.26.'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Diğer üç yöntemin (de Soto, Basit Taylor ve İyileştirilmiş Taylor) hesaplama doğrulukları dikkate alındığında yeni yöntem, düşük ve yüksek ışıınım değerlerinde %4,5 ve %1,1 'lik bir hata ile maksimum çıkış gücünü hesaplayabildiği görülmektedir. Ancak, adı geçen çalışmada belirtilen iki yöntem (Basit Taylor ve İyileştirilmiş Taylor) için hesap yükü oldukça fazladır. Diğer yöntemde (de Soto yöntemi) ise, referans model parametrelerini hesaplayabilmek için, modül kataloglarında yer almayan; ilgili konumdaki spektral

düzeltilme çarpanına, belirli parametrelere (E_{GREF} , I_{0REF} , E_G) ve son olarak da elde edilen denklemleri çözebilmek için özel bir denklem çözme programına (Engineering Equation Solver) ihtiyaç vardır (De Soto vd., 2006). Yeni yöntemin hesaplama doğruluğu diğer yöntemlere göre az olsa da, diğer yöntemlere göre daha kolay hesaplanır ve daha uygulanabiliridir.



Şekil 5.26. Yeni yöntemin farklı yöntemlerde karşılaştırılması (Lun vd., 2013)

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, mevcut çok kanallı ölçüm sistemine 2 adet sıcaklık sensörü bağlanarak ölçme sisteminde iyileştirme yapılmıştır. Bu sayede I-V eğrileri ile modül ve çevre sıcaklığı değerleri eş zamanlı olarak ölçülebilir hale getirilmiştir. Böylece, dış ortamda gölgelendirme yöntemi kullanılarak bir fotovoltaik modülün dış sıcaklık katsayılarını elde etmek mümkün hale gelmiştir.

İncelenen alttan temaslı tek kristal Si fotovoltaik modülün elektriksel davranışı tek diyot eşdeğer devre yaklaşımı ile modellenmiştir. Bu modeli tanımlayan referans model parametreleri, bu çalışmada ortaya konan yeni bir yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, referans model parametrelerini hesaplamak için gerekli olan seri direnç başlangıç (R_{S0REF}) değeride ilk defa bu tez çalışmasında türetilen ve doğrulunun ispatı verilen yeni bir bağıntı ile hesaplanmıştır. Yeni bağıntı, mevcut yöntemlerden farklı olarak, R_{S0REF} değerini sadece modül kataloglarında yer alan ve sayısal değer olarak verilen V_{OCREF} , I_{MREF} ve I_{SCREF} parametrelerinden elde etmektedir. Bu bağıntının geçerliliği, ticari olarak temin edilebilen 50 adet kristal silisyum (çok:mc-Si ve tek:m-Si) tabanlı fotovoltaik modül için doğrulanmıştır (Çizelge 5.4. ve Şekil 5.1.). Başlangıç değerlerini (R_{S0REF} ve R_{SH0REF}) ve model parametrelerini (A , I_L , I_0 , R_S ve R_{SH}) hesaplamak ve dolayısıyla modül performansının simülasyonunu gerçekleştirmek için gerekli olan sayısal bilgiler doğrudan modül kataloglarından temin edilmiştir (Çizelge 3.1.; V_{OCREF} , V_{MREF} , I_{SCREF} , I_{MREF} , N_S , α ve β).

Yeni yöntem kullanılarak, iç ve dış sıcaklık katsayıları için farklı çalışma şartlarındaki I-V eğrilerinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2.-5.12.). Ayrıca farklı ışıınım profiline sahip günler içinde maksimum çıkış gücü (P_M) (Şekil 5.14.-5.17.), elektrik çıktısı/enerjisi (E) (Çizelge 5.8.) ve verimlik (η) (Şekil 5.20.-5.23.) değerleri, yine iç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanmıştır. Simülasyonu gerçekleştirilen ve hesaplanan eğriler/değerler için elde edilen hatalar incelendiğinde (Şekil 5.13., Şekil 5.18., Şekil 5.19. ve Şekil 5.24.), modül performansını simüle etmek/hesaplamak için kullanılan iç ve dış sıcaklık katsayılarının, modül performansına belirgin bir etkilerinin olmadığı tespit edilmiştir. İç ve dış sıcaklık katsayıları için elde edilen hata değerleri, düşük ışıınımda bile %0,7 puan farkla

(Şekil 5.13.'teki 1 numaralı ölçüm) aynı mertebededir. Mevcut çalışmalartarandığında, iç ve dış sıcaklık katsayılarının modül performansını dikkate alarak değerlendirilmesi, ilk defa bu çalışmada gerçekleştirilmiştir.

Genellikle, kristal silisyum tabanlı modüllere ait iç ve dış sıcaklık katsayılarının, hesaplandıkları ışıınım değerinin $\pm\%30$ aralığında geçerli oldukları veya olabilecekleri bildirilmiştir (Siddiqui vd., 2014; Standards, 1990). Dolayısıyla, bu ölçüte göre kabul edilen düşük ışıınım değerlerinde ($G < 700 \text{ W/m}^2$), iç ve dış sıcaklık katsayılarının modülün dış ortamdaki performansını yansıtmadığı veya yansıtamayacağı bildirilmiştir. Ancak, belirli hata sınırları içerisinde elde edilen sonuçlara göre iç ve dış sıcaklık katsayılarının, düşük ışıınım değeri olarak kabul edilen aralıkta ($0-700 \text{ W/m}^2$) bile, modül performansını simüle edebilmek için yeterli oldukları sonucuna varılmıştır. Buna göre, bir fotovoltatik modülün dış ortamdaki performansını simüle edebilmek veya hesaplayabilmek için, modül kataloglarında sunulan iç sıcaklık katsayılarının bilinmesi yeterlidir. Uzun ve zorlu ölçümlerden elde edilen dış sıcaklık katsayılarının bilinmesine gerek yoktur. Bunun yanında, kurumsal olmayan veya küçük çaplı modül üreticileri, ekipman maliyetlerinden dolayı, modül kataloglarında olması gereken iç sıcaklık katsayılarını kullanıcılara sunamamaktadırlar. Bu durumda, modül performansının sıcaklıkla olan değişimini matematiksel olarak tanımlayan dış sıcaklık katsayıları, belirli ölçütler uygulanarak gölgelendirme yöntemi ile elde edilebilir.

Yeni yöntem sırasıyla test modülünün dış ortamdaki akım-gerilim (I-V) eğrisini, düşük ışıınım durumu için, yaklaşık olarak $\%4,0$; gün boyunca ölçülen maksimum çıkış değerlerini $\%4,5$; verimlilik değerlerini $\%4,0$ ve enerji çıktısı değerini de $\%1,7$ 'lik bir hata payı ile simülasyonunu gerçekleştirebilmekte ve hesaplayabilmektedir (Şekil 5.13., Şekil 5.18., Şekil 5.19. ve Şekil 5.24.). Ölçüm esnasındaki, değişken çevre şartları, modül sıcaklığının arka yüzeyden okunması, spektral düzeltme hatası, ışıınım okuma hatası gibi kaynaklar dikkate alındığında elde edilen hata değerleri kabul edilebilir seviyelerdedir (Dubard vd., 2014; Emery, 2009).

Bu çalışmada sunulan yeni yöntem, ek bilgilere, iterasyon yöntemlerine ve kullanıcı tahminli değerlere gerek duymadan kristal tabanlı silisyum modüllerin performansını (I-V eğrisi, P_M , η ve E) simüle edebilmektedir. Yeni yöntem, sahip olduğu az

hesaplama yükü, referans model parametrelerini hesaplamak için gerekli olan bilgilerin erişim kolaylığı, lisans alma zorunluluğu olan özel yazılımlara veya paket programlara (basit bir yazılım dili kullanılarak yöntem kodlanabilir) ve pahalı ölçüm ekipmanlarına gerek duymaması gibi sebeplerden dolayı daha önce bu alanda yapılmış çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu yöntem, aşırı düzeyde teorik ve pratik bilgiye gerek duymadan; doğruluk, hesaplama kolaylığı ve uygulanabilirlik arasındaki dengeyi sağlayarak fotovoltaiik tasarımcılar ve son kullanıcılar tarafından tercih edilen bir simülasyon aracı olma potansiyeline sahiptir.

Bu doktora çalışmasında, düzeltilmiş diyot faktörünün sıcaklıktan ve ışıınımdan bağımsız olduğu kabul edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda düzeltilmiş diyot faktörü için farklı yaklaşımları dikkate alarak, ortaya konan yeni yöntemin simülasyon kabiliyeti araştırılmalıdır. Benzer, yaklaşımlar seri direncin ve paralel direncin sıcaklık veya ışıınımdan bağımlılığı için de uygulanabilir. Ayrıca fotovoltaiik modül, çift diyot eşdeğer devre modeli ile modellenerek, özellikle de düşük ışıınımdan veya gölgelenme durumları için, yeni yöntemin simülasyon/hesaplama doğruluğu arttırılabilir. Ancak bu durum 7 adet model parametresinin hesaplanmasına, hesaplama yükünün artmasına ve dolayısıyla yöntemin sahip olduğu basitlik ve uygulanabilirliğinin azalmasına neden olacaktır.

KAYNAKLAR

- Adamo, F., Attivissimo, F., Nisio, A. Di, Lanzolla, A.M.L., Spadavecchia, M., (2009) Parameters Estimation For A Model Of Photovoltaic Panels, *Fundamental and Applied Metrology*, 964–967.
- Alqahtani, A.H., (2012) A simplified and accurate photovoltaic module parameters extraction approach using MATLAB, *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, 1748–1753.
- Averbukh, M., Lineykin, S., Kuperman, A., (2012) Obtaining small photovoltaic array operational curves for arbitrary cell temperatures and solar irradiation densities from standard conditions data ,*Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 21: 1016–1024.
- Bai, J., Liu, S., Hao, Y., Zhang, Z., Jiang, M., Zhang, Y., (2014) Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules, *Energy Convers. Manag.*, 79: 294–303.
- Batzelis, E.I., Papathanassiou, S.A., (2015) A Method for the Analytical Extraction of the Single-Diode PV Model Parameters, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 7: 504–512.
- Bellia, H., Youcef, R., Fatima, M., (2014) A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB, *NRIAG J. Astron. Geophys.*, 3: 53–61.
- Can, H., Ickilli, D., (2013)Parameter Estimation in Modeling of Photovoltaic Panels Based on Datasheet Values, *J. Sol. Energy Eng.*, 136 (021002): 1-5.
- Celik, A.N., Acikgoz, N., (2007) Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models, *Appl. Energy*, 84: 1–15.
- Chan, D.S.H., Phangd, J.C.H., (1987) Analytical Methods for the Extraction of Solar-Cell Single- and Double-Diode Model Parameters from I- V Characteristics, *IEEE Trans. Electron Devices*, 34: 286–293.

- Chen, Y., Wang, X., Li, D., Hong, R., Shen, H., (2011) Parameters extraction from commercial solar cells I–V characteristics and shunt analysis, *Appl. Energy*, 88: 2239–2244.
- Chouder, A., Silvestre, S., Sadaoui, N., Rahmani, L., (2012) Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters, *Simul. Model. Pract. Theory*, 20: 46–58.
- Cipriani, G., Di Dio, V., Marcotulli, A., Miceli, R., (2014) Manufacturing tolerances effects on PV array energy production, *3rd Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA*, 952–957.
- Ciulla, G., Lo Brano, V., Di Dio, V., Cipriani, G., (2014) A comparison of different one-diode models for the representation of I–V characteristic of a PV cell, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, (32): 684–696.
- Cotfas, D.T., Cotfas, P.A., Kaplanis, S., (2013) Methods to determine the dc parameters of solar cells: A critical review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 28: 588–596.
- Cubas, J., Pindado, S., de Manuel, C., (2014a) Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function, *Energies*, 7:4098–4115.
- Cubas, J., Pindado, S., Victoria, M., (2014b) On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior, *J. Power Sources*, 247: 467–474.
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Rosa, P., (2015) End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 47: 552–561.
- Cuce, E., Cuce, P.M., Bali, T., (2013) An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters, *Appl. Energy*, 111: 374–382.
- Da Costa, W.T., Fardin, J.F., Machado Neto, L. de V.B., Simonetti, D.S.L., (2014) Estimation of irradiance and temperature using photovoltaic modules, *Sol. Energy*, 110: 132–138.
- Dash, P.K., Gupta, N.C., Centre, S.E., Complex, C.G.O., Delhi, N., (2015) Effect of Temperature on Power Output from Different Commercially available Photovoltaic Modules, *Int. Journal of Engineering Research and Applications*,

5: 148–151.

De Blas, M., Torres, J., Prieto, E., García, A., (2002) Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices, *Renew. Energy*, 25: 371–380.

De Soto, W., Klein, S. A., Beckman, W. A., (2006) Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, *Sol. Energy*, 80: 78–88.

Deihimi, M.H., Naghizadeh, R.A., Meyabadi, A.F., (2016) Systematic derivation of parameters of one exponential model for photovoltaic modules using numerical information of data sheet, *Renew. Energy*, 87: 676–685.

Devabhaktuni, V., Alam, M., Shekara Sreenadh Reddy Depuru, S., Green, R.C., Nims, D., Near, C., (2013) Solar energy: Trends and enabling technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 19: 555–564.

Ding, K., Zhang, J., Bian, X., Xu, J., (2014) A simplified model for photovoltaic modules based on improved translation equations, *Sol. Energy*, 101: 40–52.

Dubard, J., Filtz, J.-R., Cassagne, V., Legrain, P., (2014) Photovoltaic module performance measurements traceability: Uncertainties survey, *Measurement*, 51: 451–456.

Dupré, O., Vaillon, R., Green, M.A., (2015) Physics of the temperature coefficients of solar cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 140: 92–100.

Durisch, W., Urban, J., Smestad, G., (1996) Characterisation of solar cells and modules under actual operating conditions, *Renew. Energy*, 8: 359–366.

Eke, R., (2007) Güneş Pili Parametrelerinin İşletme Koşullarıyla İlişkilendirilmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.

Elbaset, A.A., Ali, H., Sattar, M.A., (2014) Novel seven-parameter model for photovoltaic modules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 130: 442–455.

Emery, K., (2009) Uncertainty Analysis of Certified Photovoltaic Measurements at the National Renewable Energy Uncertainty Analysis of Certified Photovoltaic Measurements at the National Renewable Energy, *NREL*.

- Emery, K., Burdick, J., Caiyem, Y., Dunlavy, D., Field, H., Kroposki, B., Moriarty, T., Ottoson, L., Rummel, S., Strand, T., Wanlass, M.W., (1996) Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems, *Conf. Rec. Twenty Fifth IEEE Photovolt. Spec. Conf.*
- 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: 152-159.
- Gow, J.A., Manning, C.D., (1999) Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies, *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, 146:193-200.
- Granata, J.E., Boyson, W.E., Kratochvil, J.A., Li, B., Abbaraju, V., Tamizhmani, G., Pratt, L., (2011) Successful Transfer Of Sandia National Laboratories Outdoor Test Technology To Tüv Rheinland Photovoltaic Testing Laboratory, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 37th IEEE* : 003132 – 003137.
- Green, M. A., (2003) General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 11: 333–340.
- Hadj A., Chenlo, F., Benghanem, M., (2004) Loss-of-load probability of photovoltaic water pumping systems, *Sol. Energy*, 76: 713–723.
- Hejri, M., Mokhtari, H., Azizian, M.R., Ghandhari, M., Soder, L., (2014) On the Parameter Extraction of a Five-Parameter Double-Diode Model of Photovoltaic Cells and Modules, *IEEE J. Photovoltaics*, 4: 915–923.
- Huang, B.J., Yang, P.E., Lin, Y.P., Lin, B.Y., Chen, H.J., Lai, R.C., Cheng, J.S., (2011) Solar cell junction temperature measurement of PV module, *Sol. Energy*, 85: 388–392.
- Huld, T., Dunlop, E., Beyer, H.G., Gottschalg, R., (2013) Data sets for energy rating of photovoltaic modules, *Sol. Energy*, 93: 267–279.
- Humada, A.M., Hojabri, M., Mekhilef, S., Hamada, H.M., (2016). Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 56: 494–509.

- Ismail, M.S., Moghavvemi, M., Mahlia, T.M.I., (2013) Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm, *Energy Convers. Manag.*,73: 10–25.
- Jack, V., Salam, Z., Ishaque, K., (2015) Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application : A review, *Appl. Energy*,154: 500–519.
- Jakhrani, A.Q., Othman, A.K., Samo, S.R., Rigit, R.H., (2011) Comparison of Solar Photovoltaic Module Temperature Models, *World Appl. Sci. J. 14 (Special Issue Food Environ.*: 01-08.
- Jena, D., Ramana, V.V., (2015) Modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance: A critical review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 52: 400–417.
- Jia, Q.X., Ebihara, K., Ikegami, T., (1995) Analytical solution for solar cell model parameters from illuminated current-voltage characteristics, *Philos. Mag. Part B*, 72: 375–382.
- Jiang, J.-A., Wang, J.-C., Kuo, K.-C., Su, Y.-L., Shieh, J.-C., Chou, J.-J., (2012) Analysis of the junction temperature and thermal characteristics of photovoltaic modules under various operation conditions, *Energy*,44: 292–301.
- Jung, J.-H., Ahmed, S., (2012) Real-time simulation model development of single crystalline photovoltaic panels using fast computation methods, *Sol. Energy*, 86: 1826–1837.
- Kaldellis, J.K., Kapsali, M., Kavadias, K. A.,(2014) Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece, *Renew. Energy*, 66: 612–624.
- Kamarzaman, N.A., Tan, C.W., (2014) A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*,37: 585–598.
- Kamkird, P., Ketjoy, N., Rakwichian, W., Sukchai, S., 2012. Investigation on Temperature Coefficients of Three Types Photovoltaic Module Technologies under Thailand Operating Condition, *Procedia Eng.*, 32: 376–383.

- Kandil, K., Altoug, M., AL-Assadd, A., Alshamari, L., Kadad, I., Ghoneim, A., (2011) Investigation of the Performance of CIS Photovoltaic Modules under Different Environmental Conditions, *Smart Grid Renew. Energy*, 02: 375–387.
- Kaplani, E., Kaplanis, S., (2014) Thermal modelling and experimental assessment of the dependence of PV module temperature on wind velocity and direction, module orientation and inclination, *Sol. Energy*, 107: 443–460.
- Kavasoglu, A.S., Kavasoglu, N., (2009) Application of Beta model to heterojunction structure, *Curr. Appl. Phys.*, 9: 894–899.
- Kavasoglu, N., Kavasoglu, A. S., Oktik, S., (2009) A new method of diode ideality factor extraction from dark I–V curve, *Curr. Appl. Phys.*, 9: 833–838.
- Kavasoğlu, A.S., (2000) ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se₂ Heteroeklem Güneş Pilinin Elektriksel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniveristesi, Muğla
- Khan, F., Baek, S.-H., Park, Y., Kim, J.H., (2013) Extraction of diode parameters of silicon solar cells under high illumination conditions, *Energy Convers. Manag.*, 76: 421–429.
- Khanna, V., Das, B.K., Bisht, D., Singh, P.K., (2015) A three diode model for industrial solar cells and estimation of solar cell parameters using PSO algorithm, *Renew. Energy*, 78: 105–113.
- King, D.L., (1996) Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions, içinde: *Proceeding of NREL/SNL Photovoltaic Program Review Meeting, Lakewood, CO*: 1-22.
- King, D.L., Kratochvil, J.A., Boyson, W.E., (1997) Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties, and results, *Photovolt. Spec. Conf. Conf. Rec. Twenty-Sixth IEEE*: 1183–1186.
- Krauter, S., Preiss, A., (2009) Comparison of module temperature measurement methods, *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*: 333–338.
- Lalwani, M., Kothari, D.P., Singh, M., (2010) Investigation of Solar Photovoltaic Simulation Softwares, *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 1: 585–601.

- Laudani, A., Riganti Fulginei, F., Salvini, A., (2014) High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms, *Sol. Energy*, 103: 316–326.
- Lim, L.H.I., Ye, Z., Ye, J., Yang, D., Du, H., (2015) A linear method to extract diode model parameters of solar panels from a single I–V curve, *Renew. Energy*, 76: 135–142.
- Lineykin, S., Averbukh, M., Kuperman, A., (2014) An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 30: 282–289.
- Lo Brano, V., Orioli, A., Ciulla, G., (2012) On the experimental validation of an improved five-parameter model for silicon photovoltaic modules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 105: 27–39.
- Lo Brano, V., Orioli, A., Ciulla, G., Di Gangi, A., (2010) An improved five-parameter model for photovoltaic modules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 94: 1358–1370.
- Lun, S., Du, C., Guo, T., Wang, S., Sang, J., Li, J., (2013) A new explicit I–V model of a solar cell based on Taylor’s series expansion, *Sol. Energy*, 94: 221–232.
- Ma, T., Yang, H., Lu, L., (2014). Solar photovoltaic system modeling and performance prediction, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 36: 304–315.
- Mahmoud, Y.A., Xiao, W., Zeineldin, H.H., (2013) A parameterization approach for enhancing PV model accuracy, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60: 5708–5716.
- 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.
- Massi Pavan, A., Mellit, A., Lughì, V., (2014) Explicit empirical model for general photovoltaic devices: Experimental validation at maximum power point, *Sol. Energy*, 101: 105–116.
- Mattei, M., Notton, G., Cristofari, C., Muselli, M., Poggi, P., (2006) Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance, *Renew. Energy*, 31: 553–567.

- Meyer, E., van Dyk, E., (2000) Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature, *Renew. Energy* 21, 37–47.
- Miceli, R., Orioli, A., Di Gangi, A., (2015) A procedure to calculate the I–V characteristics of thin-film photovoltaic modules using an explicit rational form, *Appl. Energy* 155, 613–628.
- Muñoz-García, M. A., Marin, O., Alonso-García, M.C., Chenlo, F., (2012) Characterization of thin film PV modules under standard test conditions: Results of indoor and outdoor measurements and the effects of sunlight exposure, *Sol. Energy*, 86: 3049–3056.
- Navabi, R., Abedi, S., Hosseinian, S.H., Pal, R., (2015) On the fast convergence modeling and accurate calculation of PV output energy for operation and planning studies, *Energy Convers. Manag.*, 89: 497–506.
- O'Donnell, K.P., Chen, X., (1991) Temperature dependence of semiconductor band gaps, *Appl. Phys. Lett.*, 58: 2924–2926.
- Orioli, A., Di Gangi, A., (2013) A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data, *Appl. Energy*, 102: 1160–1177.
- Ortiz-Rivera, E.I., Peng, F.Z., (2005) Analytical Model for a Photovoltaic Module using the Electrical Characteristics provided by the Manufacturer Data Sheet. *36th Power Electron. Spec. Conf.*, 2087–2091.
- 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.
- Özden, Ş., (2015) Farklı Sürelerle CdCl₂ Ortamında Isıl İşlem Görmüş İnce Film CdTe/Cds Güneş Pillerinin Elektriksel Karakterizasyon Yöntemleriyle İncelenmesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Paulescu, M., Badescu, V., Dughir, C., (2014) New procedure and field-tests to assess photovoltaic module performance, *Energy*, 70: 49–57.
- Peng, L., Sun, Y., Meng, Z., 2014. An improved model and parameters extraction for photovoltaic cells using only three state points at standard test condition, *J. Power Sources*, 248: 621–631.

- Peng, L., Sun, Y., Meng, Z., Wang, Y., Xu, Y., (2013) A new method for determining the characteristics of solar cells, *J. Power Sources*, 227: 131–136.
- Perraki, V., Kounavis, P., (2016) Effect of temperature and radiation on the parameters of photovoltaic modules, *J. Renew. Sustain. Energy*, 8: 013102.
- Phang, J.C.H., Chan, D.S.H., Phillips, J.R., (1984) Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters, *Electron. Lett.*, 20: 406–408.
- Rus-Casas, C., Aguilar, J.D., Rodrigo, P., Almonacid, F., Pérez-Higueras, P.J., (2014) Classification of methods for annual energy harvesting calculations of photovoltaic generators, *Energy Convers. Manag.*, 78: 527–536.
- Sadok, M., Mehdaoui, A., (2008) Outdoor testing of photovoltaic arrays in the Saharan region, *Renew. Energy*, 33: 2516–2524.
- Salih, S.M., Salih, F.F., Hasan, M.L., Bedaiawi, M.Y., (2012) Performance Evaluation of Photovoltaic Models Based on a Solar Model Tester, *Int. J. Inf. Technol. Comput. Sci.*, 4: 1–10.
- Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., Masmoudi, A., (2012) MATLAB / Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell, *International Journal Of Renewable Energy Research*, 2: 1–8.
- Saloux E Teyssedou A, S.M., (2011) Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point, *Sol. Energy*, 1: 713–722.
- Sandrolini, L., Artioli, M., Reggiani, U., (2010) Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis, *Appl. Energy*, 87: 442–451.
- Schwingshackl, C., Petitta, M., Wagner, J.E., Belluardo, G., Moser, D., Castelli, M., Zebisch, M., Tetzlaff, A., (2013) Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation, *Energy Procedia*, 40: 77–86.
- Sera, D., Teodorescu, R., Rodriguez, P., (2007) PV panel model based on datasheet values, *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, 2392–2396.

- Shahat, A. El, (2014) PV Module Optimum Operation Modeling, *J. Power Technol.*,94: 50–66.
- Sharma, V., Chandel, S.S., (2013) Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 27: 753–767.
- Sharma, V., Kumar, A., Sastry, O.S., Chandel, S.S., (2013) Performance assessment of different solar photovoltaic technologies under similar outdoor conditions, *Energy*, 58: 511–518.
- Shockley, W., (1949) The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors, *Bell Syst. Tech. J.*, 28: 435–489.
- Shongwe, S., Hanif, M., (2015) Comparative Analysis of Different Single-Diode PV Modeling Methods, *IEEE J. Photovoltaics*, 5: 938–946.
- Siddiqui, M.U., Abido, M., (2013) Parameter estimation for five- and seven-parameter photovoltaic electrical models using evolutionary algorithms, *Appl. Soft Comput.*, 13: 4608–4621.
- Siddiqui, M.U., Arif, A. F.M., Bilton, A. M., Dubowsky, S., Elshafei, M., (2013) An improved electric circuit model for photovoltaic modules based on sensitivity analysis, *Sol. Energy*,90: 29–42.
- Siddiqui, R., Kumar, R., Jha, G.K., Bajpai, U., (2014) Performance Analysis of Polycrystalline Silicon PV Modules on the basis of Indoor and Outdoor Conditions, *Int. J. Curr. Eng. Technol.*,4: 340–349.
- Singh, P., Ravindra, N.M., (2012) Temperature dependence of solar cell performance-an analysis, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 101: 36–45.
- Singh, P., Singh, S., Lal, M., Husain, M., (2008) Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cel, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 92:1611–1616.
- Skoplaki, E., Palyvos, J. A., (2009a) On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Sol. Energy*, 83: 614–624.

- Skoplaki, E., Palyvos, J.A., (2009b) Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlation, *Renew. Energy*, 34: 23–29.
- Standards, B. of I., (1990) Procedure for Temperature and Irradiance Corrections to measured I-V characteristics of Crystalline Silicon Photovoltaic Device, *Indian Bureau of Standard*.
- Tamrakar, R., Gupta, A., (2015) A review extraction of solar cell modelling parameters, *IJIREEICE*, 3: 55–60.
- Thevenard, D., Pelland, S., (2013) Estimating the uncertainty in long-term photovoltaic yield predictions, *Sol. Energy*, 91:432–445.
- Tian, H., Mancilla-David, F., Ellis, K., Muljadi, E., Jenkins, P., (2012) A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels, *Sol. Energy*, 86,:2695–2706.
- Tossa, A.K., Soro, Y.M., Azoumah, Y., Yamegueu, D., (2014) A new approach to estimate the performance and energy productivity of photovoltaic modules in real operating conditions, *Sol. Energy*, 110: 543–560.
- Tozlu, C., (2004) Muğla Üniversitesinde Kurulu Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemlerin Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi, Muğla.
- Trinuruk, P., Sorapipatana, C., Chenvidhya, D., (2009) Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand, *Renew. Energy*, 34: 2515–2523.
- 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: 198–200.
- Varshni, Y., (1967) Temperature Dependence Of The Energy Gap in Semiconductors, *Physica*, 53: 149–154.
- Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R., (2009) Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, *Power Electron. IEEE Trans.*, 24: 1198–1208.

- Virtuani, A., Strepparava, D., Friesen, G., (2015) A simple approach to model the performance of photovoltaic solar modules in operation, *Sol. Energy*, 120: 439–449.
- Wang, J.-C., Shieh, J.-C., Su, Y.-L., Kuo, K.-C., Chang, Y.-W., Liang, Y.-T., Chou, J.-J., Liao, K.-C., Jiang, J.-A., (2011) A novel method for the determination of dynamic resistance for photovoltaic modules, *Energy*, 36: 5968–5974.
- Wohlgemuth, J.H., (2012) Standards for pv modules and components – Recent developments and challenges, *27th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, 2976–2980.
- Wolf, P., Benda, V., (2013). Identification of PV solar cells and modules parameters by combining statistical and analytical methods, *Sol. Energy*, 93: 151–157.
- Yıldırım, N., Tacer, E., (2016) Identification of photovoltaic cell single diode discrete model parameters based on datasheet values, *Sol. Energy*, 127: 175–183.

EKLER

Ek A. Test modülünün teknik kataloğu

SUNSET AS HPC Series 95 – 110 W_p

The solar generators AS -HPC consist of high powered monocrystalline 5" cells (HPC), made of SUNsilicon®. The cells distinguish themselves by particularly high electricity output, even on cloudy days. The tried and tested module design protects the solar cells against moisture, gives UV stability, and allows for thermal expansion. The front covering is made of top quality tempered solar glazing. The solar glazing and the solar cell laminate are joined together into a unit and mounted in a torsion resistant frame, made of anodized aluminium. The solar modules of the AS HPC family are well protected from mechanical and climatic influences. The connection is housed in a weatherproof wiring box at the back in which also the bypass diodes are mounted. Due to their high efficiency the solar generators AS HPC are mainly used in solar arrangements like tracking systems or roof top installations.



Sunset AS HPC series at a glance

- 32 high-powered monocrystalline silicon solar cells (HPC) made from SUNsilicon® with an efficiency up to 20%
- High current and higher power output compared to other modules
- Electrical contacts are on the back of the cell leaving the entire front surface available to absorb and convert the sun rays
- Smooth and dark surface which is free of metal gridlines gives a very stylish and modern appearance
- Manufactured under German quality standards
- Also suitable for SUNpower Roof® integration system and SUNpremium® field mounting system

The world's future energy[®] by

www.sunset-solar.com

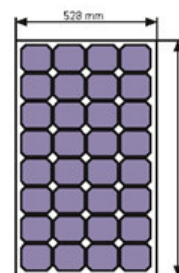


Module series AS 95 / 100 / 105 / 110 HPC

Technical specifications AS

		95 HPC	100 HPC	105 HPC	110 HPC
Nominal power ($\pm 5\%$)	P_{max} [W _p]	95	100	105	110
Rated current	I_{MPP} [A]	5.35	5.60	5.80	6.00
Rated voltage	V_{MPP} [V]	17.7	17.8	18.1	18.3
Short circuit current	I_{sc} [A]	5.75	6.00	6.20	6.40
Open circuit voltage	V_{oc} [V]	21.5	21.6	21.7	21.9

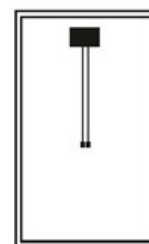
Peak power under test conditions (STC: 1000 W/m², 25 °C, spectrum AM 1,5)



Technical specifications AS

		95 HPC	100 HPC	105 HPC	110 HPC
Nominal power	P_{max} [W _p]	69.4	73.0	76.7	80.3
Rated current	I_{MPP} [A]	4.31	4.51	4.67	4.83
Rated voltage	V_{MPP} [V]	16.2	16.4	16.7	16.8
Short circuit current	I_{sc} [A]	4.63	4.83	5.00	5.15
Open circuit voltage	V_{oc} [V]	20.1	20.1	20.2	20.4

Rated value with nominal operating cell temperature (NOCT: 800 W/m², 46 ± 2 °C, spectrum AM 1,5)



Properties for system design

Protection class		II				
System voltage	V_{sys} [V]	600	Temperature coefficient I_{sc}	α	[%/K]	+ 0.06
Reverse current	I_k [A]	15	Temperature coefficient V_{oc}	β	[%/K]	- 0.28

Mechanical properties

Front covering	3.2 mm solar glass	Protection class	junction box IP 65
Back covering	multi layer foil	Cable connection	Multi Contact MC3 or compatible
Type of cell	mono crystallin	Weight	6.7 kg
Dimensions	1040 x 528 x 35 mm		

Over the years SUNSET Solar has set high benchmarks with its high quality standards. Continuous tests guarantee a consistently high level of quality. Every module undergoes visual, mechanical, and electrical inspections. This is recognisable by means of the original SUNSET label, the serial number, and the SUNSET guarantee:

- 5 years product warranty
- 10 years linear performance warranty for a power output of 90%
- 25 years linear performance warranty for a power output of 80%
- Detailed warranty conditions and additional information can be found in our warranty terms
- Production according to IEC 61215 and IEC 61730

Partner:

SUNSET Energietechnik GmbH
 • Industriestraße 8-22 • D-91325 Adelsdorf
 • Telefon 091 95 9494-0 • Telefax 091 95 9494-290
 • E-Mail: support@sunset-solar.com

Specifications subject to technical changes.

Ek B. Denklem (4.7) ve (4.9)'u elde etmek için yapılan yaklaşımlar

-Kısa devre şartı durumunda ($I = I_{SC}, V = 0$) tek diyot eşdeğer devre modelinin genel ifadesi olan denklem (4.5) aşağıdaki gibi olur.

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{Ak_B T}} - 1 \right) - \frac{(V + IR_S)}{R_{SH}} \quad (4.5)$$

Mevcut kristal silisyum tabanlı modüllerin sahip oldukları kısa devre akımı 2-10 A aralığında, ters doyum akımları ise 10^{-8} A mertebelerindedir. Benzer şekilde, seri direnç ve paralel direnç değerli ise 1 Ω ve 100 Ω mertebesinde.

İncelediğimiz modül için $I_{SCREF}=6$ A, $I_{LREF}\approx 6$ A, $R_{SREF}<1$ Ω ve $R_{SHREF}>50$ Ω 'dur. Ayrıca $I_{OREF}\approx 10^{-8}$ Amper olarak kabul edilmiştir. Bu verilenler için yukarıdaki ifadeye bulunan her bir terimin değeri, sırası ile 6 Amper, $2,7 \times 10^{-4}$ Amper ve 0,12 Amper olarak hesaplanır. Bu durumda ortada bulunan terim ihmal edilerek denklem(4.7) elde edilmiş olur

$$I_{LREF} = \frac{(R_{SREF} + R_{SHREF})}{R_{SHREF}} I_{SCREF} \quad (4.7)$$

-Açık devre gerilimi noktasındaki I-V eğrisinin eğim şartı kullanıldığı durumunda tek diyot modeli yaklaşımının genel ifadesi aşağıdaki hale gelir.

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_{OCREF}} = - \frac{\frac{q}{AkT} I_{OREF} e^{\frac{qV_{OCREF}}{AkT_{REF}}} + \frac{1}{R_{SHREF}}}{1 + R_{SREF} \left(\frac{q}{AkT_{REF}} I_{OREF} e^{\frac{qV_{OCREF}}{AkT_{REF}}} + \frac{1}{R_{SHREF}} \right)} = - \frac{1}{R_{S0REF}} \quad (4.9a)$$

İncelediğimiz modül için, $V_{OCREF}=21.6$ Volt, $\frac{q}{AkT_{REF}} \approx 1.02$, $I_{0REF} \approx 10^{-8}$ Amper ve

$R_{SHREF} > 50 \Omega$ 'dur. İfadenin payında ve paydadaki parantez içerisindeki aynı terim bulunmaktadır. Verilen değerler için aşağıdaki yaklaşımın doğruluğunu gösterelim.

$$\frac{qI_{0REF}}{Akt} e^{\frac{qV_{OCREF}}{AkT_{REF}}} \gg \frac{1}{R_{SHREF}} \quad (4.9b)$$

Verilen değerler kullanılarak hesaplanan yaklaşımın sonucuna ($37,8 \gg 0,02$) göre payda ve paydada parantez içerisinde bulunan $1/R_{SHREF}$ terimi ihmal edilebilir. Böylece denklem (4.9) elde edilir.

$$R_{SREF} = R_{S0REF} - \frac{1}{\frac{q}{Akt} I_{0REF} e^{\frac{qV_{OCREF}}{AkT_{REF}}}} \quad (4.9)$$

Ek C. Ölçülen (I_{MEAS}) ve hesaplanan ($I_{IÇ_TC}$ ve $I_{DIŞ_TC}$) akım değerleri

İç ve dış sıcaklık katsayıları için hesaplanan akım değerleri $I_{IÇ_TC}$ ve $I_{DIŞ_TC}$ ile gösterilmiştir

V (V)	I_{MEAS} (A)	$I_{IÇ_TC}$ (A)	$I_{DIŞ_TC}$ (A)
0,00	4,397	4,435	4,434
1,02	4,396	4,429	4,428
2,04	4,391	4,423	4,422
3,06	4,394	4,417	4,416
4,08	4,393	4,412	4,411
5,10	4,389	4,406	4,405
6,13	4,385	4,399	4,399
7,15	4,384	4,393	4,393
8,17	4,380	4,388	4,387
9,18	4,380	4,381	4,380
10,20	4,380	4,375	4,374
11,22	4,375	4,368	4,367
12,25	4,370	4,360	4,359
13,26	4,361	4,348	4,348
14,27	4,345	4,327	4,326
15,29	4,307	4,279	4,280
16,31	4,206	4,165	4,170
17,34	3,968	3,882	3,895
18,36	3,421	3,250	3,279
19,39	2,271	1,986	2,042
20,46	0,000	-0,180	-0,096

Ek D. Gün boyunca ölçülen G , T_M , P_{M_MEAS} , η_{MEAS} , hesaplanan maksimum çıkış gücü ($P_{M_İÇ}$ ve $P_{M_DİŞ}$) ve verimlilik ($\eta_{İÇ}$ ve $\eta_{DİŞ}$) değerleri

Yerel Zaman	G (W/m ²)	T (°C)	P_{M_MEAS} (W)	$P_{M_İÇ}$ (W)	$P_{M_DİŞ}$ (W)	η_{MEAS} (%)	$\eta_{İÇ}$ (%)	$\eta_{DİŞ}$ (%)
07:37	58,68	4,47	5,42	5,61	5,60	17,77	18,38	18,34
07:42	65,33	4,79	6,10	6,27	6,25	17,95	18,45	18,41
07:47	68,61	5,19	6,41	6,59	6,57	17,97	18,47	18,42
07:52	73,18	5,52	6,89	7,04	7,02	18,10	18,50	18,46
07:57	80,66	5,84	7,67	7,79	7,77	18,30	18,56	18,52
08:02	96,41	6,07	9,30	9,37	9,35	18,55	18,70	18,66
08:07	98,96	6,47	9,50	9,62	9,60	18,46	18,69	18,66
08:12	97,43	6,87	9,28	9,45	9,43	18,31	18,65	18,62
08:17	99,42	6,99	9,45	9,65	9,63	18,28	18,66	18,63
08:22	115,36	7,50	11,15	11,25	11,23	18,59	18,76	18,72
08:27	122,78	7,93	11,95	11,99	11,97	18,72	18,78	18,74
08:32	145,22	8,63	14,32	14,25	14,22	18,96	18,87	18,84
08:37	145,14	9,07	14,29	14,22	14,19	18,94	18,84	18,81
08:42	143,11	9,54	14,06	13,99	13,96	18,89	18,80	18,77
08:47	142,38	9,93	13,98	13,90	13,87	18,88	18,77	18,74
08:52	150,63	10,32	14,88	14,72	14,69	18,99	18,79	18,76
08:57	172,18	10,87	17,16	16,89	16,86	19,17	18,86	18,83
09:02	175,91	11,49	17,46	17,23	17,20	19,09	18,84	18,81
09:07	175,31	12,16	17,31	17,13	17,10	18,99	18,79	18,76
09:12	153,45	12,16	14,97	14,91	14,88	18,77	18,68	18,65
09:17	171,23	12,12	16,92	16,72	16,69	19,01	18,77	18,74
09:22	204,50	12,94	20,33	20,05	20,03	19,12	18,86	18,83
09:27	294,66	14,30	29,24	29,18	29,14	19,08	19,04	19,02
09:32	242,17	15,34	24,16	23,71	23,68	19,19	18,83	18,81
09:37	220,04	15,42	21,87	21,45	21,43	19,12	18,75	18,73
09:42	218,37	14,52	21,76	21,35	21,33	19,16	18,80	18,78
09:47	181,29	13,65	17,87	17,64	17,62	18,95	18,72	18,69
09:52	165,39	12,39	16,33	16,11	16,08	18,99	18,73	18,70
09:57	199,69	12,41	20,00	19,60	19,57	19,26	18,88	18,85
10:02	218,82	13,25	21,90	21,49	21,47	19,25	18,89	18,87
10:07	206,32	13,28	20,55	20,22	20,19	19,15	18,84	18,82
10:12	258,86	14,36	26,18	25,50	25,47	19,45	18,94	18,92
10:17	280,30	16,53	28,12	27,48	27,46	19,29	18,86	18,84
10:22	236,44	16,81	23,57	23,00	22,98	19,17	18,71	18,69
10:27	237,13	16,97	23,51	23,06	23,04	19,07	18,70	18,68
10:32	188,73	16,72	18,37	18,20	18,18	18,72	18,54	18,52
10:37	133,68	15,70	12,77	12,74	12,72	18,37	18,32	18,30
10:43	84,36	13,95	7,67	7,92	7,91	17,48	18,05	18,02
10:47	76,87	12,49	6,95	7,22	7,21	17,40	18,06	18,04
10:52	83,75	11,45	7,76	7,93	7,92	17,82	18,21	18,18
10:57	132,75	10,87	13,01	12,87	12,85	18,85	18,65	18,62

Ek D. (devam)

11:07	194,51	12,67	19,47	19,05	19,03	19,25	18,84	18,81
11:12	336,47	14,61	35,41	33,44	33,40	20,24	19,11	19,09
11:17	303,29	17,22	30,78	29,75	29,73	19,52	18,87	18,85
11:22	418,08	20,16	42,43	41,03	41,01	19,52	18,88	18,86
11:27	430,10	24,50	42,85	41,58	41,57	19,16	18,59	18,59
11:32	286,63	23,25	28,08	27,44	27,44	18,84	18,41	18,41
11:37	201,74	20,57	19,53	19,23	19,22	18,61	18,33	18,32
11:42	213,50	16,70	21,16	20,69	20,67	19,06	18,64	18,62
11:47	179,60	13,74	17,70	17,47	17,44	18,96	18,70	18,68
11:52	192,95	13,47	19,13	18,84	18,82	19,07	18,78	18,75
11:57	202,85	13,72	20,23	19,83	19,80	19,18	18,80	18,78
12:02	192,55	14,64	18,89	18,72	18,70	18,87	18,70	18,67
12:07	195,67	14,05	19,52	19,08	19,05	19,18	18,75	18,73
12:12	204,65	13,57	20,31	20,02	20,00	19,09	18,82	18,79
12:17	273,77	12,45	27,83	27,21	27,17	19,55	19,11	19,08
12:22	389,69	12,54	40,41	39,20	39,15	19,94	19,35	19,32
12:27	349,00	13,10	35,92	34,91	34,87	19,79	19,24	19,21
12:32	378,84	13,32	39,12	37,98	37,93	19,86	19,28	19,25
12:37	461,70	14,50	47,87	46,38	46,32	19,94	19,32	19,29
12:42	438,56	15,64	45,09	43,81	43,76	19,77	19,21	19,19
12:47	383,10	15,76	38,88	38,09	38,05	19,52	19,12	19,10
12:52	326,51	16,02	32,84	32,26	32,22	19,34	19,00	18,98
12:57	296,34	14,96	29,95	29,28	29,25	19,43	19,00	18,98
13:02	320,67	14,64	32,74	31,81	31,78	19,63	19,08	19,06
13:07	322,91	14,83	32,80	32,02	31,98	19,53	19,07	19,05
13:12	303,95	14,09	30,74	30,15	30,12	19,45	19,08	19,05
13:17	297,34	13,78	30,13	29,50	29,47	19,49	19,08	19,06
13:22	305,04	13,83	31,02	30,29	30,25	19,56	19,10	19,07
13:27	290,71	13,92	29,47	28,81	28,77	19,49	19,06	19,03
13:32	271,61	14,10	27,46	26,83	26,80	19,44	19,00	18,97
13:37	272,09	12,61	27,70	27,02	26,98	19,58	19,10	19,07
13:42	264,07	10,98	26,88	26,34	26,30	19,57	19,18	19,15
13:47	249,34	10,49	25,38	24,86	24,82	19,57	19,17	19,14
13:52	233,53	9,88	23,71	23,27	23,23	19,52	19,16	19,13
13:57	224,44	9,64	22,74	22,35	22,31	19,48	19,15	19,12
14:02	218,87	9,33	22,15	21,80	21,76	19,46	19,15	19,12
14:07	204,18	8,91	20,57	20,31	20,27	19,38	19,12	19,09
14:12	195,34	8,67	19,66	19,41	19,37	19,35	19,11	19,07
14:17	177,53	7,81	17,74	17,62	17,59	19,22	19,09	19,05
14:22	153,38	7,22	15,21	15,16	15,13	19,06	19,01	18,97
14:27	136,61	6,88	13,43	13,45	13,42	18,90	18,94	18,90
14:32	124,15	6,20	12,16	12,20	12,18	18,83	18,90	18,86
14:37	117,89	5,68	11,51	11,58	11,56	18,78	18,89	18,85
14:42	126,46	5,65	12,43	12,46	12,44	18,90	18,95	18,91
14:47	156,37	5,67	15,63	15,55	15,52	19,22	19,13	19,09

Ek D. (devam)

14:52	175,66	6,29	17,70	17,52	17,48	19,38	19,18	19,14
14:57	195,46	7,04	19,81	19,53	19,49	19,49	19,21	19,18
15:02	221,60	7,99	22,59	22,18	22,14	19,60	19,25	19,21
15:07	232,82	8,85	23,74	23,28	23,24	19,61	19,23	19,19
15:12	255,57	9,30	26,13	25,61	25,56	19,66	19,27	19,24
15:17	299,41	10,18	30,87	30,09	30,04	19,82	19,33	19,29
15:22	322,44	11,20	33,24	32,38	32,33	19,83	19,31	19,28
15:27	335,87	12,00	34,62	33,68	33,63	19,82	19,29	19,26
15:32	381,07	13,14	39,47	38,23	38,18	19,92	19,29	19,27
15:37	413,98	14,43	42,71	41,46	41,41	19,84	19,26	19,24
15:42	384,17	14,64	39,51	38,35	38,31	19,78	19,20	19,18
15:47	397,07	15,31	40,50	39,59	39,55	19,62	19,17	19,15
15:52	419,40	15,50	42,96	41,86	41,82	19,70	19,19	19,17
15:57	379,98	16,72	38,15	37,64	37,61	19,31	19,05	19,03
16:02	382,92	17,55	38,62	37,83	37,80	19,40	19,00	18,98
16:07	371,97	17,75	37,97	36,69	36,66	19,63	18,97	18,95
16:12	335,08	18,08	33,78	32,89	32,86	19,39	18,88	18,86
16:17	342,51	18,71	34,16	33,57	33,54	19,18	18,85	18,83
16:22	280,35	18,51	27,65	27,29	27,27	18,96	18,72	18,71
16:27	256,35	16,32	25,58	25,07	25,04	19,19	18,80	18,79
16:32	287,29	16,13	28,95	28,24	28,21	19,38	18,90	18,88
16:37	302,57	16,87	30,38	29,72	29,69	19,31	18,89	18,87
16:42	445,62	21,38	44,47	43,63	43,61	19,19	18,83	18,82
16:47	262,69	21,25	25,69	25,25	25,24	18,81	18,49	18,48
16:52	252,75	19,19	24,71	24,44	24,43	18,80	18,60	18,59
16:57	218,36	15,98	21,72	21,24	21,22	19,13	18,71	18,69
17:02	242,62	15,89	24,27	23,71	23,68	19,23	18,79	18,77
17:07	172,74	14,66	16,96	16,72	16,69	18,88	18,61	18,59
17:12	173,64	14,10	16,90	16,84	16,82	18,72	18,65	18,63
17:17	136,66	12,64	13,20	13,18	13,16	18,58	18,55	18,53
17:22	102,86	11,67	9,63	9,83	9,81	18,01	18,38	18,35
17:27	124,68	9,96	12,32	12,10	12,07	19,00	18,66	18,62
17:32	107,69	9,76	10,22	10,39	10,37	18,25	18,55	18,51
17:37	103,40	9,70	9,81	9,96	9,94	18,24	18,51	18,48
17:42	126,77	9,52	12,28	12,33	12,30	18,63	18,70	18,67
17:47	84,08	9,31	7,93	8,03	8,01	18,13	18,36	18,33
17:52	115,74	9,06	11,14	11,23	11,21	18,52	18,65	18,62
17:57	100,35	8,67	9,62	9,68	9,67	18,44	18,56	18,52
18:02	103,21	8,67	9,92	9,97	9,95	18,49	18,58	18,55
18:07	101,27	8,64	9,71	9,78	9,76	18,43	18,57	18,53
18:12	78,74	7,83	7,39	7,54	7,52	18,06	18,41	18,37
18:17	70,99	7,36	6,64	6,77	6,76	17,98	18,35	18,31
18:22	63,22	6,85	5,83	6,01	6,00	17,73	18,28	18,24
18:27	49,05	6,83	4,40	4,61	4,60	17,24	18,06	18,02

Ek E. Seri direnç başlangıç (R_{S0REF}) değerlerini hesaplamak için gerekli olan parametreler

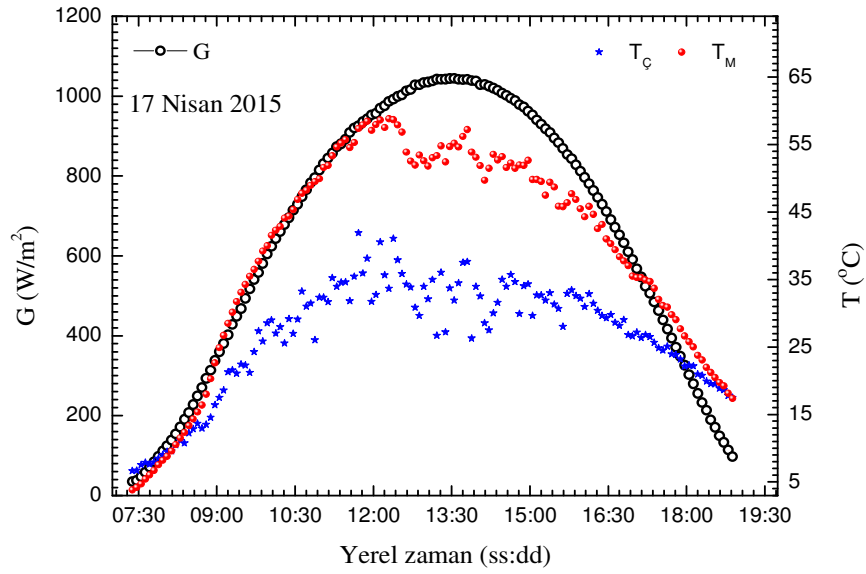
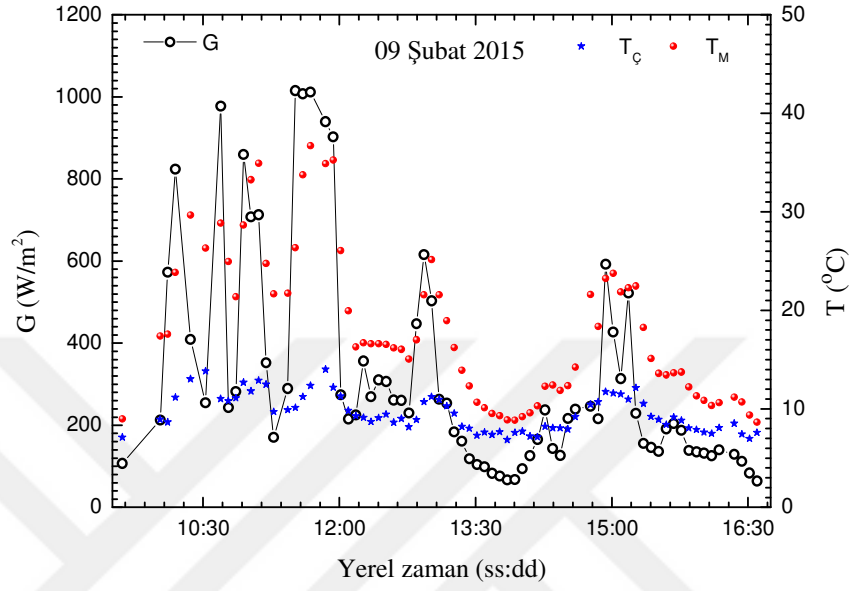
#	MODULE NAME	V_{OCREF} (V)	V_{MREF} (V)	I_{SCREF} (A)	I_{MREF} (A)
1	Aide Solar XZST-190	33,20	26,10	7,80	7,30
2	Amerisolar AS-6m30	36,90	30,20	8,31	7,20
3	Amerisolar as-6m 27	33,00	26,70	8,23	7,49
4	Amerisolar AS-5m170	44,19	35,68	5,20	4,77
5	Amerisolar AS-6p27 200	32,80	26,90	8,24	7,44
6	Alfasolarpyramid54-210	33,49	25,58	8,89	8,21
7	Alfasolarpyramid60-237	37,37	28,52	9,00	8,31
8	Alfasolarpyramid80-311	49,37	37,75	8,95	8,24
9	Alpexsolar ALP240	37,47	30,80	8,42	7,79
10	AstropowerAP-6105	20,50	16,30	4,60	4,00
11	AstropowerAP-1106	20,70	16,70	7,50	6,60
12	AstropowerAP-1206	21,00	16,90	7,70	7,10
13	Azur solar M 180U-3	43,50	35,90	5,30	5,02
14	BP3 SERIES 235	37,2	29,80	8,48	7,89
15	bisol BMU/227	37,10	29,20	8,35	7,80
16	Canadian Solar CS5A-200M	45,30	37,40	5,71	5,35
17	Canadian Solar CS6A-180P	29,40	23,40	8,04	7,49
18	Canadian Solar CSP-230P	36,80	29,60	8,34	7,78
19	Canadian Solar CSP-235	36,9	29,80	8,46	7,90
20	Canadian Solar CSP-250M	37,50	30,40	8,74	8,22
21	CENTROSOLAR D230	36,80	29,80	8,09	7,52
22	DEL SOLAR D6M245B3A	37,48	30,10	8,64	8,14
23	DEL SOLAR D6P240B3A	36,96	30,20	8,49	7,97
24	FVG60-156-235M	37,25	30,30	8,28	7,77
25	FVG60-156-240P-MC	37,60	30,50	8,28	7,88
26	GE ENERGY PVP200-M(P)	32,90	26,30	8,10	7,60
27	HelliosTechnology	36,93	29,14	8,06	7,55
28	HelliosTecnology	36,95	29,15	8,11	7,55
29	ISO FOTON ISF145	22,40	18,10	8,55	8,00
30	KYOCERA KC85	21,70	17,40	5,34	5,02
31	KYOCERA 200GT	32,90	26,30	8,21	7,61
32	KYOCERA KD210	33,20	26,60	8,58	7,90
33	PHOTOWATT PW6123-120	21,90	17,60	7,60	7,00
34	LİGİTEK PV LM090AA00	22,35	17,72	5,35	5,03
35	LİGİTEK PV LM090AB00	22,35	17,72	5,33	5,08
36	LORENTZ LC120-12P	21,40	17,10	7,70	7,10
37	Lorentz LA130-12S	21,00	17,50	1,90	1,70
38	LORENTZ LC175-24M	44,40	35,00	5,40	5,00
39	LG MONOX-260	37,30	30,10	8,94	8,64
40	SIEMENS SM55	21,70	17,40	3,45	3,15
41	SHELL S115(P)	32,80	26,80	4,70	4,29
42	SHELL S36	21,40	16,50	2,30	2,20
43	SOLARDAY PX60-220(P)	37,10	28,50	8,29	7,72
44	SOLAREX-MSX64	21,30	17,50	4,00	3,66

Ek E. (devam)

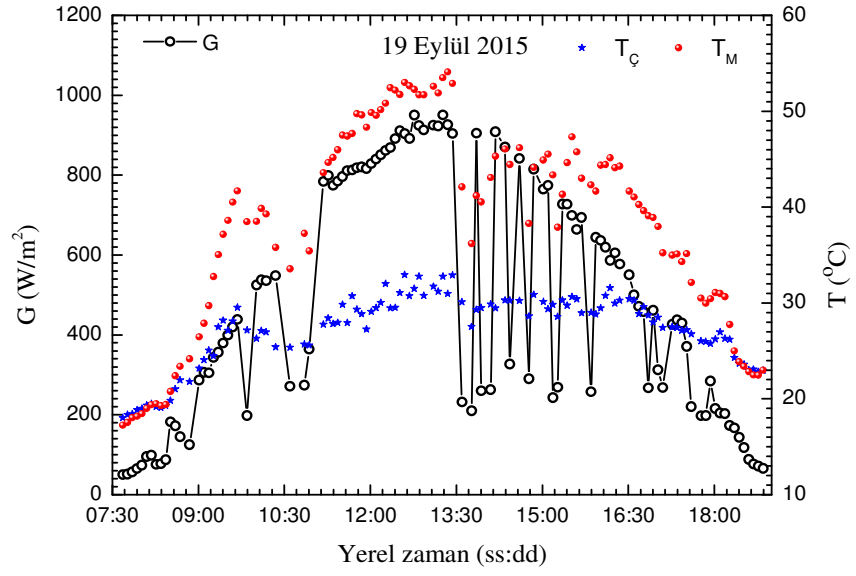
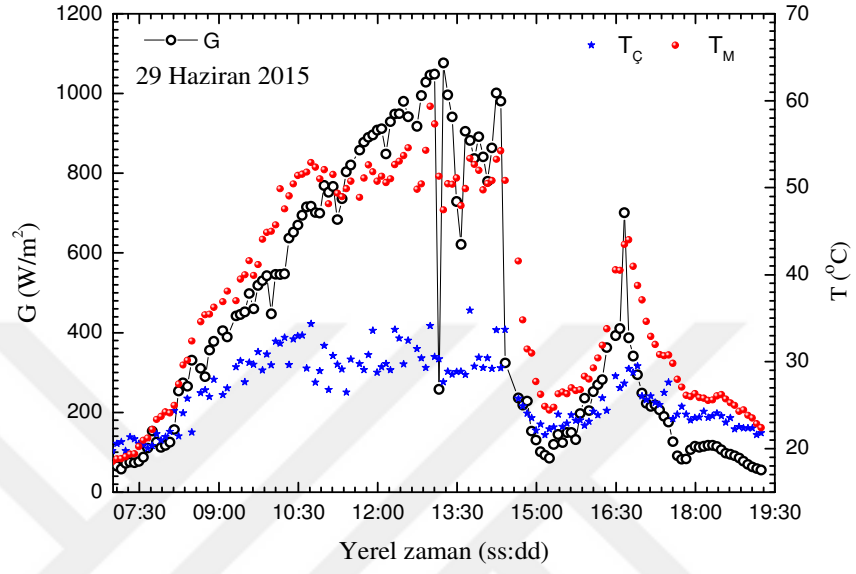
45	SOLARFUN SF190-195	32,70	26,80	8,06	7,28
46	SUNTECH STP170S-24	43,80	35,20	5,14	4,83
47	Toplsolar Tsm72125M170	43,50	35,20	5,28	4,83
48	Toplsolar Tsm96125M220	57,60	46,56	5,28	4,73
49	TRINA SOLAR TSM240	37,30	29,90	8,50	8,04
50	Yocasol LDA170	44,30	35,10	5,44	4,85



Ek F. Seçilen günler için ölçülen çalışma şartları; ışımm (G), modül sıcaklığı (T_M) ve çevre sıcaklığı (T_C) değerleri



Ek F. (devam)



Ek G. KC200GT modülün teknik kataloğu

THE NEW VALUE FRONTIER



KC200GT

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module. The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%. These cells are encapsulated between a tempered glass cover and a potant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions. The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation. Equipped with plug-in connectors.



APPLICATIONS

KC200GT is ideal for grid tie system applications.

- Residential roof top systems
- Large commercial grid tie systems
- Water Pumping systems
- High Voltage stand alone systems
- etc.

QUALIFICATIONS

- MODULE : UL1703 certified
- FACTORY : ISO9001 and ISO 14001

QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.

- Thermal cycling test • Thermal shock test • Thermal / Freezing and high humidity cycling test • Electrical isolation test
- Hail impact test • Mechanical, wind and twist loading test • Salt mist test • Light and water-exposure test • Field exposure test

LIMITED WARRANTY

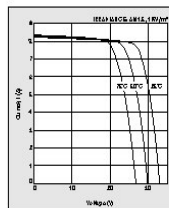
• 1 year limited warranty on material and workmanship

• 20 years limited warranty on power output. For detail, please refer to 'category IV' in Warranty issued by Kyocera.

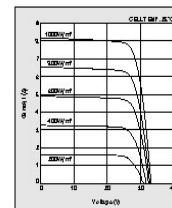
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera.)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various irradiance levels

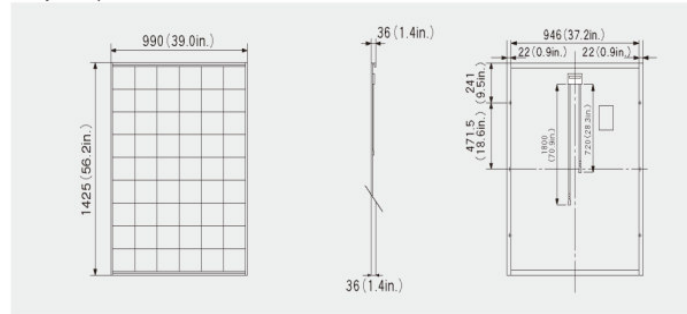


SPECIFICATIONS

KC200GT

Physical Specifications

Unit : mm (in.)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (STC)	
Maximum Power (P _{max})	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	26.3V
Maximum Power Current (I _{mp})	7.61A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	32.9V
Short Circuit Current (I _{sc})	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of V _{oc}	−1.23×10 ^{−1} V/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	3.18×10 ^{−2} A/°C
STC: Irradiance 1000W/m ² , AM1.5 spectrum, Module temperature 25°C	
Electrical Performance at 800W/m ² , NOCT, AM1.5	
Maximum Power (P _{max})	142W
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	23.2V
Maximum Power Current (I _{mp})	6.13A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	29.9V
Short Circuit Current (I _{sc})	6.82A
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): 47°C	

Cells	
Number per Module	54
Module Characteristics	
Length × Width × Depth	1425(56.2) × 990(39.0) × 36(1.4) mm
Weight	16.5kg (40.7lbs.)
Cable	1×72mm(2.8 in.) × 180mm(7.1 in.)
Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	113mm(4.5 in.) × 70mm(2.8 in.) × 40mm(1.6 in.)
IP Code	IP65
Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	7.8%
Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m ² to 200W/m ² (module temperature 25°C)	

Please contact our office for further information



KYOCERA Corporation

KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION
3 Takeda Tsubakono-cho
Fushimi-ku, Kyoto
612-8501, Japan
TEL (81)75-604-3476 FAX (81)75-604-3475
http://www.kyocera.com

KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acacia Drive
Scottsdale, AZ 85260, USA
TEL (1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX (1)480-483-6431
http://www.kyocerasolar.com

KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Gaillard 661, Lote A
22790-500, Recanto dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brazil
TEL (55)21-2427-8525 FAX (55)21-2427-2338
http://www.kyocerasolar.com.br

KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde
N.S.W. 2113, Australia
TEL (61)2-8670-3948 FAX (61)2-9888-8588
http://www.kyocerasolar.com.au

KYOCERA Fineceramics GmbH

Fritz Müller strasse 107, D-73730 Esslingen, Germany
TEL (49)714-93924-917 FAX (49)714-93924-950
http://www.kyocerasolar.de

KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #13-02/05
Central Plaza, Singapore 168730
TEL (65)6271-0500 FAX (65)6271-0900

KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong
TEL (852)2-7237183 FAX (852)2-7244611

KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanjing West Road, Taipei, Taiwan
TEL (886)2-2555-3609 FAX (886)2-2559-4151

KYOCERA(Tianjin) Sales & Trading Corporation

1W, Tower C HeChao Building 8A Guanghua Rd.,
Chao Yang District, Beijing 100026, China
TEL (86)10-6585-2270 FAX (86)10-6585-2250

Kyocera reserves the right to modify these specifications without notice

LE-8068/0703-SAGRM

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Ad Soyad : Ali ŞENTÜRK
Uyruk : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi: Tutrakan (Bulgaristan) 07/02/1980
Medeni Hali : Evli
Telefon : 0 5327172843
E-posta : alisen@mu.edu.tr, info.alisenturk@gmail.com

Eğitim

Alınan Derece	Aldığı Kurum/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lise	Kocaeli Teknik Lisesi Bilgisayar Bölümü	1998
Lisans	Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü	2003
Yüksek Lisans	Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü A.B.D.	2006

İş Tecrübesi

Yıl	Yer	Pozisyon/görev
2004-2006	Hacettepe Üniversitesi	Arş. Görevlisi
2009-	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi	Uzman

Yabancı Dil

İngilizce (ÜDS:77,75), Bulgarca

Hobiler

1. Amatör Futbol Hakemi (Lisans Numarası: 28046)
2. Masa Tenisi (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Masa Tenisi Takımı)

YAYINLAR

Makaleler

- 1-) Eke, R.,Senturk A., (2016) Solar Electricity Applications at Muğla Sıtkı Koçman University Turkey, *Mugla Journal of Science and Technology*, 2 (1): 93-97.
- 2-) Şentürk, A., Eke,R., (2015) Predicting the energy yield of photovoltaic system from an individual photovoltaic module, *Physica Status Solidi C*,12:280-1282.
- 3-) Eke R.,Senturk A., (2013) Monitoring the performance of single and triple junction amorphous silicon modules in two building integrated photovoltaic (BIPV) installations, *Applied Energy*, 109: 154-162.
- 4-) Eke, R.,Senturk A., (2012) Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system, *Solar Energy*, 86-9: 2665-2672.

Bildiriler

- 1-) Şentürk, A., Eke, R., (2014) Operating Temperature Measurement Of Photovoltaic Modules For Performance Calculations, *ISSCT*, Istanbul-Turkey.
- 2-) Eke, R., Şentürk, A. (2013) Electricity Yield Of Grid Connected Photovoltaic Power Plant Applications At The MuğlaSıtkı Koçman University, Turkey, *2nd ICWEE*, Kuşadası-Aydın.
- 3-) Şentürk, A., Eke,R., (2012) Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemlerde Performans Analizi Ve Performans Analizinin 25.6 kW_p Gücündeki Çatıya Entegre Fotovoltaik Sisteme Uygulanması, *Adım Fizik Günleri Pamukkale Üniversitesi Fizik Bölümü Denizli*.
- 4-) Şentürk,A., Eke, R., Kavasoglu, A.S., (2014) Kararlı Durum Yaklaşımı İle Fotovoltaik Modülün Göze Sıcaklığının Hesaplanması, *Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantıları*, Hacettepe Üniversitesi.
- 5-) Şentürk.,A.,Eke., R., (2013) Fotovoltaik Modüllerde Performans Parametrelerinin Sıcaklığa Bağımlılığı Ve Sıcaklık Katsayıları, *Yoğun Madde Fiziği İzmir Toplantısı*.
- 6-) Eke, R., Senturk ,A., Sarıoglu, G., Oktık, O., (2012) Decrease In Performance Ratio (Pr) Of The First Bipv System Of Turkey After 103 Months Of Operation, *6th International Ege Energy Symposium & Exhibition*,Izmir- Turkey.
- 7-) Eke, R., Senturk,A., Oktık, S., (2012) Electricity Yield Of Grid Connected Photovoltaic Systems Installed At MuglaSıtkı Koçman University, *SolarTR-2 Solar Electricity Conference And Exhibition*, Antalya-Turkey
- 8-) Eke, R., Senturk, A.,Oktık, S. (2011) First Results Of The Double-Axis Sun Tracking PV System From Turkey, *26th EU-PVSEC*, Hamburg-Germany.