

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**BİR FOTOVOLTAİK PANELİN ELEKTRİKSEL
KARAKTERİSTİKLERİNİN NÜMERİK MODELLENMESİ
VE DENEYSEL VALİDASYONU**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER FARUK TUNCAY

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK

BOLU, OCAK 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ömer Faruk TUNCAY tarafından hazırlanan “**BİR FOTOVOLTAİK PANELİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN NÜMERİK MODELLENMESİ VE DENEYSEL VALİDASYONU**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 3/01/2025

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Gürcan YILDIRIM
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan YILDIZ
Düzce Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir

Aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....
ÖMER FARUK TUNCAY

ÖNSÖZ

Bir fotovoltaiik panelin bilinmeyen elektriksel karakteristiklerinin ve parametrelerinin uygulama ve deney öncesi hesaplanması ve bilinmesi panelin elektriksel davranışı için büyük bir önem arz etmektedir. Bu çalışmada, fotovoltaiik panelin bilinmeyen parametrelerini hesaplamayı sağlayan yeni bir sayısal yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem mevcut literatürde bilinen model hesaplamaları ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.



ÖMER FARUK TUNCAY

TARİH: 03/01/2025

ÖZET

BİR FOTOVOLTAİK PANELİN ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN NÜMERİK MODELLENMESİ VE DENEYSEL VALİDASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÖMER FARUK TUNCAY
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
(TEZ DANIŞMANI: PROF.DR. ALİ NACİ ÇELİK)

BOLU, OCAK- 2025
XIV + 56 sayfa

Fotovoltaik hücreler güneşimizden gelen fotonları, içindeki yarı iletken katmanlar sayesinde elektrik enerjisine dönüştüren dönüşüm sistemleridir. Fotovoltaik bir hücrenin eşdeğer devre denkleminde bulunan ışık akımı (I_{ph}), paralel şönt direnci (R_{sh}), seri iç direnç (R_s), modifiye edilmiş diyot katsayısı (a) ve ters doyma akımının (I_o) tahmin edilmesi için birçok sayısal ve analitik model geliştirilmiştir. Bu çalışmada, eşdeğer devre denkleminin çözülmesi için MATLAB yazılımı üzerinden geliştirilen “Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model” adında yeni bir analitik çözümleme yöntemi önerilmiştir. Bu model ile, sadece panelin üreticisi tarafından, kullanıcıya verilen teknik bilgileri kullanarak panelin bilinmeyen parametreleri nümerik olarak hesaplanmıştır. Yeni model ile yapılan MATLAB hesaplamalarının sonuçları, mevcut literatürde bulunan “Beş Parametrelili Model” sonuçları ve 36 hücreli polikristal bir fotovoltaik panelin farklı operasyon şartlarındaki deneysel verileri RMSE ve R-Kare istatistiksel yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu tip bir problemin çözümünde nümerik bir yaklaşım olarak kullanılan Generalized Reduced Gradient (GRG) sayısal yöntemi ile Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model, 48 hücreli polikristal bir panelin verileri referans alınarak panelin bilinmeyen parametreleri hesaplanmıştır. Geliştirilen yeni modelin, sadece panel etiketindeki teknik bilgileri kullanarak yaptığı çözümlemelerin, diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Fotoelektrik Etki, Beş Parametrelili Model, GRG Sayısal Modelleme, Işık Akımı, Ters Doyma Akımı

ABSTRACT

NUMERICAL MODELING AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A PHOTOVOLTAIC PANEL

MASTER THESIS
ÖMER FARUK TUNCAY
BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF.DR. ALİ NACİ ÇELİK)

BOLU, JANUARY 2025
XIV + 56 pages

Photovoltaic cells are conversion systems that transform the photons from the sun into electrical energy through their semiconductor layers. In the equivalent circuit equation of a photovoltaic cell, several numerical and analytical models have been developed to estimate parameters such as the light current (I_{ph}), parallel shunt resistance (R_{sh}), series resistance (R_s), modified diode factor (a), and reverse saturation current (I_o). This study proposes a new numerical method called the “Improved Five-Parameter Model” developed in MATLAB for solving the equivalent circuit equation. Using this model, the unknown parameters of a panel are calculated numerically based on only the technical information provided by the manufacturer. The results from the MATLAB calculations are compared with the existing “Five-Parameter Model” and experimental data of a 36-cell polycrystalline photovoltaic panel under different operating conditions, using statistical methods such as RMSE and R-Square. Furthermore, a numerical approach using the Generalized Reduced Gradient (GRG) numerical method is applied to solve the model, and the unknown parameters of a 48-cell polycrystalline panel are calculated. The results show that the newly developed model, using only the technical data from the panel label, provides more accurate results compared to other methods.

KEYWORDS: Photoelectric Effect, Five Parameters Model, Generalized Reduced Gradient Numerical Model, Photo Current, Reverse Saturation Current

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ	x
FOTOĞRAF LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Fotovoltaik Hücrelerin Tarihi	1
1.2 Fotovoltaik Etki ve Fotovoltaik Hücre Nedir?	3
1.3 Fotovoltaik Hücre Çeşitleri.....	4
1.3.1 Monokristal Fotovoltaik Hücreler	4
1.3.2 Polikristal Fotovoltaik Hücreler	4
1.3.3 İnce Film Fotovoltaik Hücreler	5
1.3.4 Perovskit Fotovoltaik Hücreler.....	6
1.3.5 Organik Fotovoltaik Hücreler.....	6
1.3.5 Bifasiyel Fotovoltaik Hücreler	6
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
2.1 Literatür Taraması	8
2.2 Işınım Seviyesinin Fotovoltaik Hücre Üzerindeki Etkisi	11
2.3 Sıcaklık Seviyesinin Fotovoltaik Hücre Üzerindeki Etkisi	13
2.4 Mevcutta Kullanılan Model ve Çözümler	15
2.5 Beş Parametrelili Model	17
2.6 Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model	19
3. BULGULAR.....	28
3.1 Modellerde Kullanılan Referans Değerler.....	28
3.2 GBPM ve GRG Yönteminin Karşılaştırılması	29
3.2 Beş Parametrelili Model Bulguları	35
3.2 Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model Bulguları	35
3.2 Modeller ve Deneysel Verilerin Doğrulanması.....	38
4. TARTIŞMA	52
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Fotovoltaik panelinin yapısı.....	3
Şekil 2.1. Eşdeğer devre şeması.....	8
Şekil 2.2. Işınım seviyesinin I-V eğrisine etkisi.....	12
Şekil 2.3. Işınım seviyesinin P-V eğrisine etkisi.....	12
Şekil 2.4. Sıcaklık seviyesinin I-V eğrisine etkisi.....	14
Şekil 2.5. Sıcaklık seviyesinin P-V eğrisine etkisi.....	15
Şekil 2.6. Eşdeğer devre şeması.....	17
Şekil 2.7. Bilinmeyen parametrelerin Geliştirilmiş Beş Parametrelı Model algoritması kullanılarak hesaplanması.....	26
Şekil 2.8. 25 °C ve 1000 W/m ² ‘de hesaplanan parametreler kullanılarak I-V eğrilerinin çizdirilmesi.....	27
Şekil 3.1. 25 °C ‘de, farklı ışınım değerlerinde GBPM ve GRG yöntemi ile elde gerilim ve akım değerleri.....	30
Şekil 3.2. 25 °C ‘de farklı ışınım değerlerinde GBPM ve GRG yöntemi ile elde gerilim ve güç değerleri.....	31
Şekil 3.3. 1000 W/m ² ‘de farklı sıcaklık değerlerinde GBPM ve GRG yöntemi ile elde gerilim ve akım değerleri.....	32
Şekil 3.4. 1000 W/m ² ’ de farklı sıcaklık değerlerinde GBPM ve GRG yöntemi ile elde gerilim ve güç değerleri.....	33
Şekil 3.5. Plurawatt 130 Paneli için 1000 W/m ² ve 25 °C’ de GBPM yöntemi ile elde edilen gerilim ve akım değerleri.....	37
Şekil 3.6. Plurawatt 130 Paneli için 1000 W/m ² ve 25 °C’ de GBPM yöntemi ile elde edilen gerilim ve güç değerleri.....	38
Şekil 3.7. 1063 W/m ² ve 34 °C’ de gerilim ve akım değerleri.....	41
Şekil 3.8. 1063 W/m ² ve 34 °C’ de gerilim ve güç değerleri.....	42
Şekil 3.9. 877 W/m ² ve 43 °C’ de gerilim ve akım değerleri.....	43
Şekil 3.10. 877 W/m ² ve 43 °C’ de gerilim ve güç değerleri.....	44
Şekil 3.11. 763 W/m ² ve 42 °C’ de gerilim ve akım değerleri.....	45
Şekil 3.12. 763 W/m ² ve 42 °C’ de gerilim ve güç değerleri.....	46
Şekil 3.13. 641 W/m ² ve 40 °C’ de gerilim ve akım değerleri.....	47
Şekil 3.14. 641 W/m ² ve 40 °C’ de gerilim ve güç değerleri.....	48
Şekil 3.15. 388 W/m ² ve 24 °C’ de gerilim ve akım değerleri.....	49

Şekil 3.16. 388 W/m² ve 24 °C’ de gerilim ve güç değerleri.....50



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Kyocera KC175GHT-2 ve Plurawatt 130 güneş paneli referans değerler tablosu.....	28
Tablo 3.2. Kyocera KC175GHT-2 Güneş Panelinin, GRG Yöntemi ve Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model ile hesaplanan parametreleri.....	29
Tablo 3.3. Kyocera KC175GHT-2 Güneş Panelinin, farklı ışıınım değerlerinde GBPM ve GRG Yöntemi kullanılarak elde edilen akım ve gerilim değerleri...	31
Tablo 3.4. Kyocera KC175GHT-2 güneş panelinin, farklı sıcaklık değerlerinde GBPM ve GRG Yöntemi kullanılarak elde edilen akım ve gerilim değerler...	33
Tablo 3.5. PluraWatt 130 güneş paneli üzerinden ölçülen deneysel veriler.....	34
Tablo 3.6. Plurawatt güneş panelinin Beş Parametrelili Model ile hesaplanan akım ve gerilim verileri.....	35
Tablo 3.7. Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model ile farklı operasyon şartlarında hesaplanan parametreler.....	36
Tablo 3.8. Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model ile farklı operasyon şartlarında hesaplanan akım ve gerilim değerleri.....	37
Tablo 3.9. Modellerin, Plurawatt deneysel verileri ile arasındaki RMSE ve R^2 değerleri.....	40
Tablo 3.10. Farklı operasyon şartlarındaki doldurma faktörleri.....	51

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 1.1. Fotoelektrik etkiyi açıklamasının ardından Albert Einstein 1921 Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmıştır.....	1
Fotoğraf 1.2. Explorer 1 Uydusu.....	2
Fotoğraf 1.3. İnce film fotovoltaiik hücre.....	5
Fotoğraf 1.4. Perovskit fotovoltaiik hücre	6



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

μI_s	: Akım Sıcaklık Katsayısı (A/°C)
μV_o	: Gerilim Sıcaklık Katsayısı (V/°C)
a	: Modifiye edilmiş diyot katsayısı (V)
a_o	: Referans Modifiye Edilmiş Diyot Katsayısı (V)
BPM	: Beş Parametrelili Model
°C	: Sıcaklık
E_g	: Bant Aralığı Enerjisi (Ev)
E_{go}	: Referans Bant Aralığı Enerjisi (Ev)
FF	: Doldurma Faktörü
G	: Işınım seviyesi (W/m ²)
GBPM	: Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model
G_o	: Referans ışınlm Seviyesi (1000 W/m ²)
GRG	: Generalized Reduced Gradient
I_m	: Maksimum güç noktası akımı (A)
I_{mpo}	: Referans maksimum güç noktası akımı (A)
I_o	: Ters doyma akımı (A)
I_{oo}	: Referans ters doyma akımı (A)
I_{ph}	: Işık akımı (A)
I_{pho}	: Referans ışık akımı (A)
I_s	: Kısa devre akımı (A)
I_{sh}	: Şönt akımı (A)
I_{so}	: Referans kısa devre akımı (A)

K	: Boltzman Sabiti ($1,381.10^{-23}$ J/K)
n^i	: Diyot idealite Faktörü
n_o^i	: Referans diyot idealite Faktörü ($n_o^i=1$)
N_s	: Hücre sayısı
P	: Panel gücü (W)
q	: Elektron Yüğü ($1,602.10^{-19}$ C)
R^2	: R-Kare
R_s	: Seri iç direnç (Ω)
R_{sh}	: Paralel şönt direnci (Ω)
R_{sho}	: Referans paralel şönt direnci (Ω)
R_{so}	: Referans seri iç direnç (Ω)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
T_o	: Referans sıcaklık (25°C)
V_m	: Maksimum güç noktası gerilimi (V)
V_{mo}	: Referans maks. güç gerilimi (V)
V_o	: Açık devre gerilimi (V)
V_{oo}	: Referans açık devre gerilimi (V)
W	: Watt

TEŞEKKÜR

Eğitim öğretim hayatımda boyunca bana destek veren sevgili aileme, rahmetli dedelerime saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez ile ilgili yaptığım çalışmalarda bilgi ve deneyimiyle bana hep destek olan tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Ali Naci Çelik Hocama ve Sn. Prof. Dr. Gürcan Yıldırım Hocama ve ek olarak lisans öğrenimimde üstümde emeği geçen tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bana her zaman destek olan ve yol gösteren Sn. Prof. Dr. Hamdi Zenginbal Hocama teşekkürlerimi sunarım.

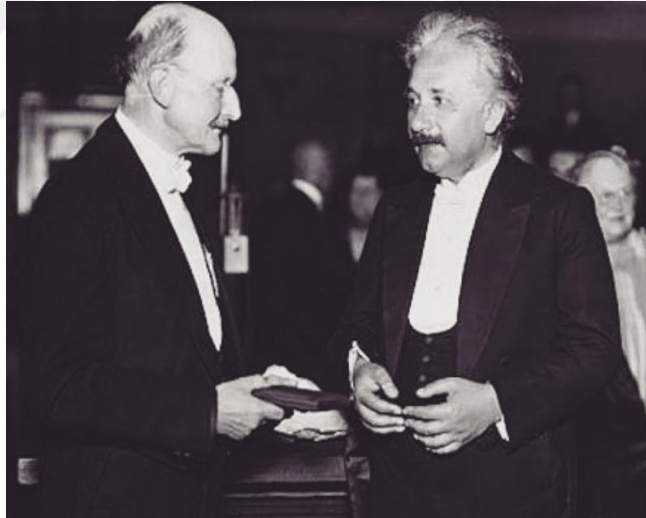
Değerli, Elektrik-Elektronik Mühendisi Muhammet Sefa Çalık, Makine Mühendisi Berkcan Çiftci ve Makine Mühendisi Hürkan Yücel arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Değerli arkadaşım Elektrik-Elektronik Mühendisi Fatma Betül Mazlum'a teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

1.1 Fotovoltaik Hücrelerin Tarihi

Fotovoltaik hücreler günümüzdeki teknolojik seviyesine gelirken birçok bilim adamı ve bilimsel çalışma bunda etkili olmuştur. 1839 yılında Alexandre Edmond Becquerel fotovoltaik etkiyi keşfetti ve ışık altında bir elektrolitik hücrede elektrik akımı üretilebileceğini gösterdi. 1883 yılına gelindiğinde Charles Fritts ilk selenyum fotovoltaik hücresini geliştirdi. Bu hücre, güneş ışığını elektriğe dönüştürüyordu ancak verimliliği çok düşüktü. 1905 yılında Albert Einstein fotovoltaik etkinin teorik temelini açıklayan bir makale yayınladı. Bu çalışması, ışığın parçacık teorisine dayanan fotoelektrik etkisini içeriyordu ve fotovoltaik hücrelerin temelini anlamada önemli bir katkı sağladı.



Fotoğraf 1.1. Fotoelektrik etkiyi açıklamasının ardından Albert Einstein 1921 Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmıştır. (wikipedia, 2020)

İlerleyen yıllarda Bell Laboratuvarları, ilk silikon fotovoltaik hücresini tanıttı. Bu hücre %6 verimlilikle güneş enerjisini elektriğe dönüştürmeyi başardı. Bu, güneş enerjisinin ticari olarak uygulanabilir hale gelmesinde büyük bir adım oldu. 1958'de fırlatılan Explorer 1 uydusu elektrik enerjisi ihtiyacını

karşlamak amacıyla bünyesinde fotovoltaik hücreler bulunduruyordu. Bu, uzayda fotovoltaik teknolojinin ilk uygulamalarından biriydi.



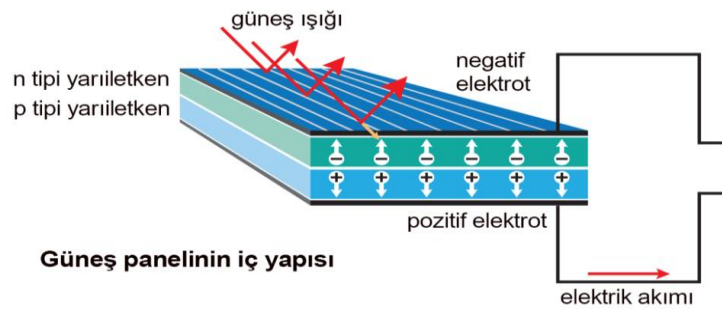
Fotoğraf 1.2. Explorer 1 Uydusu (Nasa, 2023).

1970'lere gelindiğinde, enerji krizi nedeniyle güneş enerjisi araştırmalarına büyük bir ilgi oluştu. Fotovoltaik hücrelerin verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek için araştırmalar hız kazandı. 1980'lerde ise, ince film teknolojileri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu teknoloji, daha düşük maliyetle ve daha hafif hücrelerin üretilmesini sağladı. 1990'lara gelindiğinde, gelişmiş silikon ve yeni malzeme teknolojileri ile fotovoltaik hücrelerin verimliliği %20'nin üzerine çıktı. 2000'lerde fotovoltaik sistemlerin kurulumları hızla artmaya başladı. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik politikalar ve teşvikler, güneş enerjisinin benimsenmesini hızlandırdı. 2010'larda, perovskit gibi yeni nesil malzemeler, fotovoltaik hücrelerin verimliliğini daha da artırmak için araştırılmaya başlandı. Bu malzemeler, fotovoltaik hücreler için daha düşük maliyet ve yüksek verimlilik potansiyeli sunmaktadır. 2020 ve sonrasında ise fotovoltaik teknolojide sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi konuları ön plana çıkmıştır. Daha verimli ve çevre dostu üretim yöntemleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca, dünya devletlerinin enerji politikalarının günümüzde fotovoltaik sistemlere verdiği önem giderek artmaktadır. Bölgesel ve endüstriyel teşvikler ile özellikle tarım ve sanayi alanına güneş enerjisine verilen önem gün geçtikçe artmaktadır.

1.2 Fotoelektrik Etki ve Fotovoltaik Hücre Nedir?

Fotoelektrik etki, yarı iletken bir malzemenin üzerine ışık (veya başka bir elektromanyetik dalga) düştüğünde, malzeme içindeki elektronların serbest kalması olayıdır. Bu olay, serbest elektronların hareket ederek elektrik akımı oluşturmaları, elektriğin doğrudan ışık fotonundan elde edilmesini sağlar. Albert Einstein, 1905 yılında fotoelektrik etkisini açıklayarak bu olayı bilimsel bir temele oturtmuştur (1921, Nobel Fizik Ödülü). Fotoelektrik etki ve bu alanda yapılan bilimsel çalışmalar, fotovoltaik hücrelerin ve güneş enerjisi teknolojisinin gelişiminde önemli katkı sağlamıştır. Fotovoltaik hücreler, fotoelektrik etkinin temel ilkelerine dayanarak çalışmaktadır. Güneş ışığı (foton) fotovoltaik bir hücreye çarptığında, fotoelektrik etki sayesinde elektronların serbest kalmasını sağlar ve bu sayede elektrik akımı oluşturur. Fotovoltaik hücre, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren bir cihaz olarak çalışmaktadır. Genellikle silikon gibi yarı iletken malzemeler kullanılarak üretilir. Bu hücreler, güneş enerjisini kullanarak elektrik üretir ve çeşitli uygulamalarda kullanılır.

Fotovoltaik hücreler genellikle iki ana yarı iletken malzeme katmanından oluşur; P-tipi yarı iletken katman, "pozitif" yük taşıyan deliklerin yoğun olduğu bir yarı iletken malzemedir. Genellikle bor ile doplanmış silikon kullanılır. N-tipi yarı iletken katman, "negatif" yük taşıyan serbest elektronların yoğun olduğu bir yarı iletken malzemedir. Genellikle fosfor ile doplanmış silikon kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Fotovoltaik panelinin yapısı (poweron,2020).

Güneş ışığı hücreye çarptığında enerjisini yarı iletken malzemeye aktarır. Güneş ışığı, foton adı verilen enerji parçacıklarından oluşur. Fotovoltaik hücreye çarpan fotonlar, yarı iletken malzemede bulunan elektronları uyarır. Eğer fotonun enerjisi, malzemenin bant aralığına (bandgap) eşit veya daha büyükse, bu fotonlar elektronları atomlarından kopararak serbest hale getirir. Uyarılan serbest elektronlar, N-tipi katmandan P-tipi katmana doğru hareket eder. Bu hareket, P-N bağlantısında oluşan elektrik alanı tarafından yönlendirilir. Elektronlar, pozitif yük taşıyan deliklerin olduğu P-tipi katmanda birleşir. P-tipi ve N-tipi katmanlar arasındaki elektrik alanı, serbest elektronların ve deliklerin hareketini yönlendirir. Bu elektrik alanı, P-N bağlantısının üzerinde oluşturulan potansiyel fark sayesinde oluşur. Serbest elektronlar, dış devreye yönlendirilerek bir elektrik akımı oluşturur. Elektronlar, yük taşıyarak bir devreyi tamamlar ve böylece elektrik enerjisi üretir.

1.3 Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

1.3.1. Monokristal Fotovoltaik Hücreler

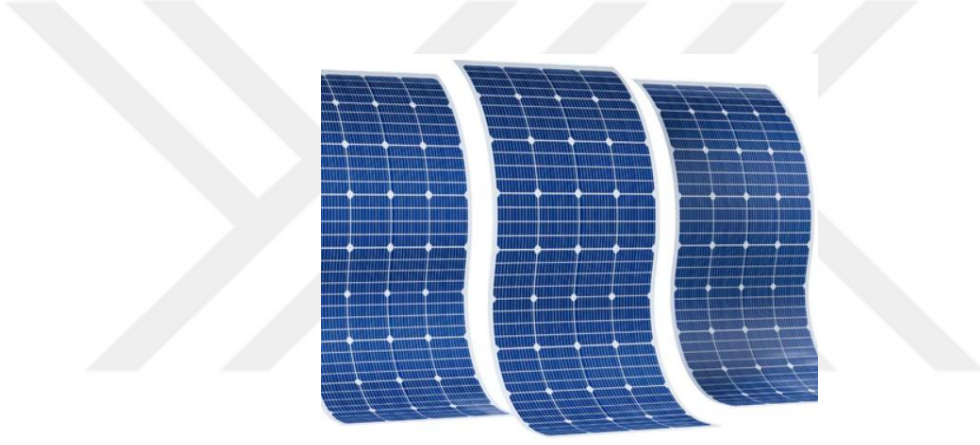
Tek kristal yapıda silikon kullanılarak üretilir. Bu, hücrenin daha düzenli bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Genellikle %15-22 arasında verimlilik sunar. Yüksek verimlilikleri sayesinde daha az alan kaplayarak daha fazla enerji üretirler. Uzun ömürlüdürler ve düşük güneş radyasyonu seviyelerinde bile iyi performans gösterirler. Üretim maliyetleri diğer fotovoltaik hücre çeşitlerine göre daha yüksektir.

1.3.2. Polikristal Fotovoltaik Hücreler

Birden fazla kristalin bir araya gelmesiyle oluşur. Üretim süreci daha basittir. Genellikle %13-17 verimlilik sağlamaktadırlar. Monokristal hücrelere göre elektriksel verimlilikleri biraz daha düşüktür. Daha düşük üretim maliyetlerinden dolayı bireysel ve tarımsal sulama alanlarında sık tercih edilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda performansları azalabilir.

1.3.3. İnce Film Fotovoltaik Hücreler

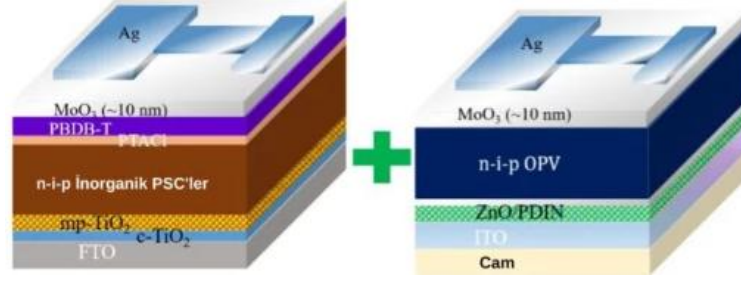
Çok ince bir fotovoltaik malzeme (genellikle kadmiyum tellür, amorf silikon veya CIGS) tabakası üzerine uygulanır. Genellikle %10-12 verimlilik sağlamaktadır, ancak bazı gelişmiş türleri %20'ye kadar çıkabilir. Daha hafif ve çok daha esnek bir yapıya sahiptirler, bu da farklı yüzeylere uygulanabilmelerini sağlar. Düşük maliyetle üretilebilirler. Düşük elektriksel verimlilikleri ve daha büyük uygulama alanı gereksinimleri nedeniyle daha fazla alan kaplamaktadırlar.



Fotoğraf 1.3 İnce film fotovoltaik hücre (shielden, 2020).

1.3.4. Perovskit Fotovoltaik Hücreler

Perovskit yapısına sahip malzemeler kullanılarak üretilir. Genellikle organik ve inorganik bileşenlerin kombinasyonunu içerir. Son yıllarda verimlilikleri hızlı bir şekilde artmış, bazı örnekler %25'in üzerinde verimliliğe ulaşmıştır. Düşük maliyet, kolay üretim ve yüksek verimlilik potansiyeli sunar. Ayrıca, esnek uygulama imkânı vardır. Uzun ömür ve kararlılık konusunda bazı zorluklar bulunmaktadır; bu nedenle ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılmaları hâlâ gelişim aşamasındadır.



Fotoğraf 1.4. Perovskit fotovoltaik hücre (yeserenerji, 2023).

1.3.5. Organik Fotovoltaik Hücreler

Organik bileşikler kullanarak üretilir. Genellikle karbon bazlı malzemeler içerir. Verimlilikleri genellikle %10'un altındadır, ancak bazı ileri çalışmalar %15'e kadar çıkabilmiştir. Hafif, esnek ve düşük maliyetli üretim olanakları sunar. Düşük verimlilik ve kısa ömür, ticari kullanımlarını sınırlamaktadır.

1.3.6. Bifasiyel Fotovoltaik Hücreler

Hem ön hem de arka yüzeyleri güneş ışığını emebilen tasarıma sahiptir. Genellikle monokristal veya polikristal hücrelerin bifasiyel versiyonlarıdır. Toplam enerji verimliliği, iki yüzeyden de güneş ışığı alabilmeleri sayesinde artabilir. Yüzey yansımından faydalananak daha fazla enerji üretimi sağlar. Genellikle daha yüksek maliyetli olabilir ve kurulum gereksinimleri özel olabilir.

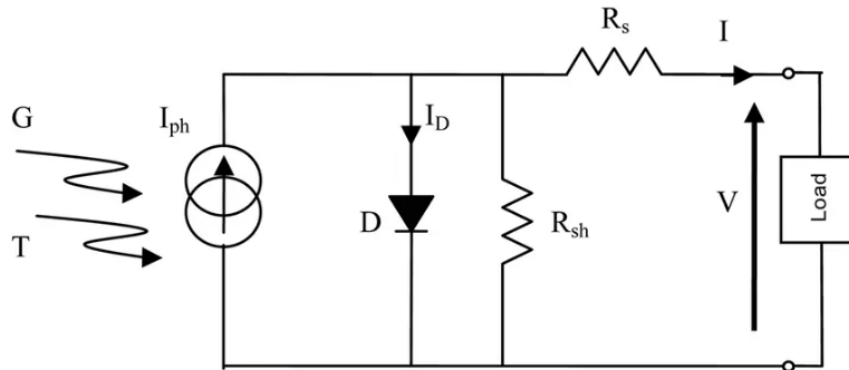
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Literatür Taraması

Fotovoltaik hücrelerin operasyon sırasındaki elektriksel performansının hesaplanması ve tahmin edilmesine yönelik geçmişten günümüze birçok bilimsel çalışma ve model geliştirilmiştir. Bir fotovoltaik hücrenin elektriksel performansını hesaplanması ve operasyon sırasında (güneş radyasyonu ve atmosfer ortamında çalışması) hangi akım ve gerilim değerlerini vereceğini bilmek; bilimsel ve fotovoltaik hücre sistemlerinin kurulumu açısından çok önemlidir (Venkateswari ve Rajasekar, 2021). Fotovoltaik hücrelerinin I-V eğrilerindeki değerlerin tahmin ve hesaplamasına yönelik bilimsel literatürde birçok farklı çalışma ve yayın yapılmıştır (Muhammad, vd., 2018). Bu çalışmalar fotovoltaik hücre çözümlemesinde hem analitik hem de sayısal yaklaşımlar öne sürmüştür (Hua ve Qiu, 2019). Bir fotovoltaik hücrenin elektriksel performansını hesaplamak için temel olarak bilinmesi gereken elektriksel parametreler vardır. Günümüz bilimsel çalışmalarında fotovoltaik hücrenin eşdeğer devresinin çözülmesi için; beş parametrelilik model, dört parametrelilik model, iki veya üç diyotlu modeller üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Aouad ve Ahmed, 2020; Franzitta, 2017; Hishikawa, 2000). Bu modeller temel alınarak yapılan matematiksel çözümlemelerde MATLAB, Pspice, MS Excel Solver, C++ gibi çeşitli yazılımlar ve algoritmalar kullanılmaktadır. Örneğin; Valerio Lo Brano ve Giuseppina Ciulla beş parametrelilik bir fotovoltaik hücrenin elektriksel parametrelerinin çözümlemesi için çalışmalarında GRG (Generalized Reduced Gradient) nümerik yöntemini kullanarak hücrenin bilinmeyen parametrelerini hesaplayıp fotovoltaik hücrelerinin I-V eğrilerini elde etmişlerdir. Fotovoltaik hücrelerin elektriksel karakteristiklerinin bulunmasına yönelik bir diğer yöntem ise Gauss-Seidel İterasyonu adlı sayısal yöntemdir. Bu model bilim insanları tarafından yapılan teorik ve deneysel çalışmalar ile polikristal (Kyocera KC200GT), monokristal (Shell SQ80) ve ince film (Shell ST40) fotovoltaik paneller ile doğrulanmış ve çift diyotlu fotovoltaik panellerin elektriksel karakteristikleri belirlenmiştir (Et-torabi, vd., 2017). Yine bu konuyla ilgili yapılan benzer bir çalışmada ise, Diferansiyel Evrim (DE) metodu kullanılarak fotovoltaik panelin elektriksel

karakteristiklerinden ışık akımı (I_{ph}), ters doyma akımı (I_o) ve paralel şönt direnci (R_{sh}) analitik olarak hesaplanırken kalan elektriksel karakteristیکler iterasyonlar yapılarak tahmin edilmiştir. Bu model üç farklı fotovoltaiك panel türü ile doğrulanmıştır (Chin, vd., 2016). Bir diğer çalışmada ise eşdeğer devre denkleminin çözümlemesi için analitik ve sayısal yöntemlerin birleşimi şeklinde oluşturulmuş bir matematiksel model önerilmiştir. Bu modele göre panel üreticisinin verdiği I-V eğrisindeki dört ana nokta kullanılarak seri iç direnç tahmin edilmiş ve bu parametreden yola çıkılarak diğer parametreler hesaplanmaya çalışılmıştır (Khotbehsara ve Shahhoseini, 2017). Eşdeğer devre denklemi ve fotovoltaiك panellerin elektriksel karakteristiklerini bulmaya yönelik bir diğer yöntem ise Metaheuristik yöntemler adıyla bilinen algoritmalar dır. Bu algoritmalar, eş değ er devre denklemi gibi lineer olmayan denklem matematiksel ifadelerin çözümü için iteratif yaklaşımlar içerir ve karmaşık optimizasyon problemleri için etkili bir çözüm sunar (Celtek ve Kul, 2023). Başka bir çalışmada ise, bu parametreleri hesaplamak için kümeleme analizini (cluster analysis) kullanarak, fotovoltaiك modülünün elektriksel parametrelerini daha doğru bir şekilde belirlemeyi amaçlanmıştır. Kümeleme analizi, verilerdeki benzer grupları belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (Sandrolini, vd., 2009).

Bir fotovoltaiك hücrenin eşdeğer devresi ve eşdeğer devrenin matematiksel ifadesi temel olarak beş farklı parametreden oluşmaktadır;



Şekil 2.1. Eşdeğer devre şeması (electricistanbul.com, 2024).

$$I_{ph} + \left(1 - \exp\left(\frac{V + I.R_s}{a}\right)\right).I_o - \frac{I.R_s + V}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

I = Yük Akımı (A)

V = Gerilim (V)

I_{ph} = Işık akımı (A)

I_o = Ters doyma Akımı (A)

R_s = Seri iç direnç (Ω)

R_{sh} = Paralel şönt direnci (Ω)

a = Modifiye edilmiş diyot katsayısı (V)

Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devre denklemindeki; Işık akımı (I_{ph}) fotovoltaik hücreye düşen ışınlam seviyesi (G) ve hücre sıcaklığı (T) ile ilişkili olup güneş ışınlam seviyesi arttıkça ışık akımı (I_{ph}) yükselmektedir. Ters doyma akımı (I_o) ve Şönt Akımı (I_{sh}) fotovoltaik hücrede bir akım kaybı oldukları için her iki değer de ışık akımından çıkarılır ve yük akımı (I) bulunur. Azınlık taşıyıcılarının nötr bölgelerden tükenme bölgesine göçü, yarı iletken diyotta ters akımın bir kısmının oluşmasına neden olur, buna ters doyma akımı (I_o) denir (Atay ve Eminoğlu, 2019). Hücre mutlak sıcaklığına ve bant genişliğine bağlıdır. Seri iç direnç (R_s) ve paralel şönt direnci (R_{sh}) Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devre denklemindeki direnç kayıplarıdır. Seri iç direncin (R_s) yükselmesi hücreden çekilen akımı azaltırken, güneş ışınlam seviyesine doğrudan bağlı olan paralel şönt direncin (R_{sh}) yükselmesi yük akımını arttırmaktadır. Modifiye edilmiş diyot katsayısı (a) hücre mutlak sıcaklığı (T) ve diyot katsayısının (n^i) bir fonksiyonudur.

Yukarıdaki beş parametrenin değerlerinin bilinmesi ile bir fotovoltaik hücrenin çekilen akıma bağlı olarak hangi gerilimi vereceği hesaplanabilmektedir. Hesaplanan bu değerler ile hücrenin I-V eğrisi oluşturulup hücrenin elektriksel karakteristiği hakkında yorum

yapılabilmektedir. Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devre denklemi lineer olmayan bir matematiksel ifadedir (Duffie ve Beckman, 2013). Dolayısıyla denkleme analitik çözümleme yapmak oldukça zordur. Bu konuyla ilgili yapılan birçok çalışmada ve yayında çoğunlukla eşdeğer devre denklemini nümerik olarak çözmeye yönelik bir yaklaşım uygulanmıştır. Sayısal çözümlemede beş parametrenin her birine bir referans değer atanarak çeşitli sayısal çözümleme algoritmaları sayesinde eşdeğer devre denkleminin farklı operasyon şartlarındaki değerini sıfıra yakınsatmaya yönelik yöntemler uygulanmaktadır (Cubas, vd., 2014).

Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devre denklemi farklı operasyon şartlarına göre tekrar düzenlenip, çözümlemede kullanılacak olan farklı denklemler elde edilebilir. Bu şartlar;

Kısa devre şartı ($V=0, I=I_s$);

$$I_{ph} + \left(1 - \exp\left(\frac{I_s R_s}{a}\right)\right) \cdot I_o - \left(\frac{I_s R_s}{R_{sh}}\right) - I_s \quad (2.2)$$

Açık devre şartı ($V=V_o, I=0$);

$$I_{ph} + \left(1 - \exp\left(\frac{V_o}{a}\right)\right) \cdot I_o - \frac{V_o}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Maksimum güç noktası ($P = P_{max}$, $V = V_m$, $I = I_m$);

$$I_{ph} + \left(1 - \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{a}\right)\right) \cdot I_s - \frac{I_m R_s + V_m}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

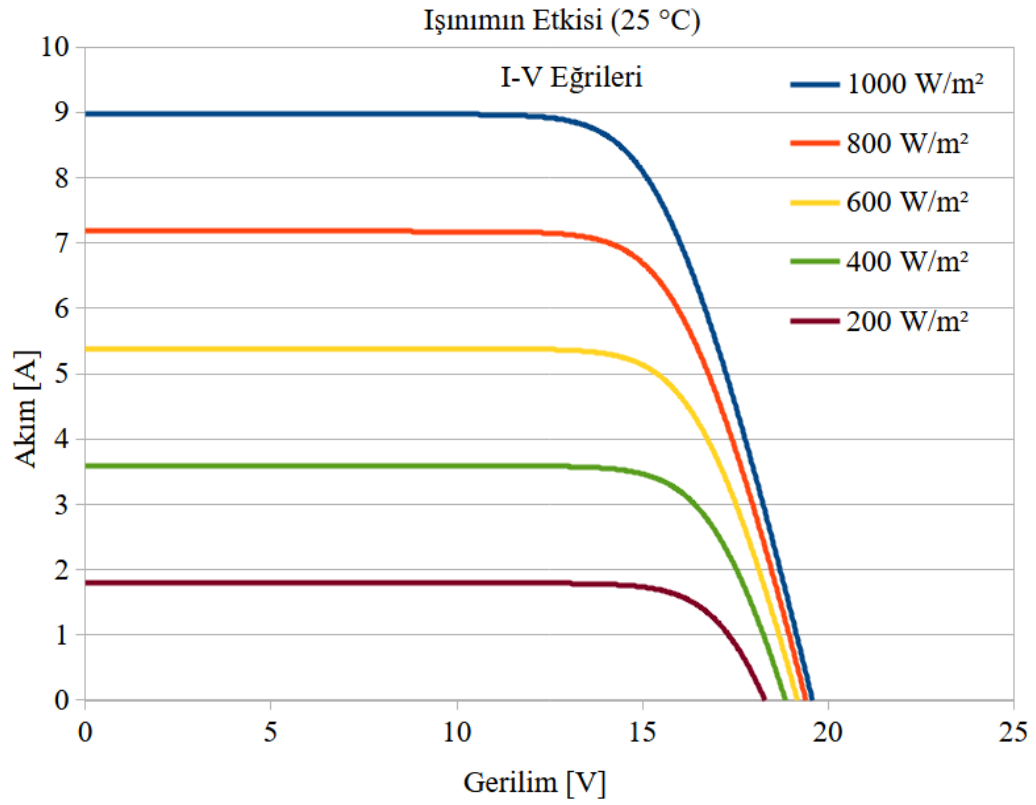
Akımın gerilime göre türevi;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-a - I_o R_{sh} \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{a}\right)}{a \left(\frac{R_s}{R_{sh}}\right) + I_o R_{sh} R_s \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{a}\right)} + \frac{I_m}{V_m} \quad (2.5)$$

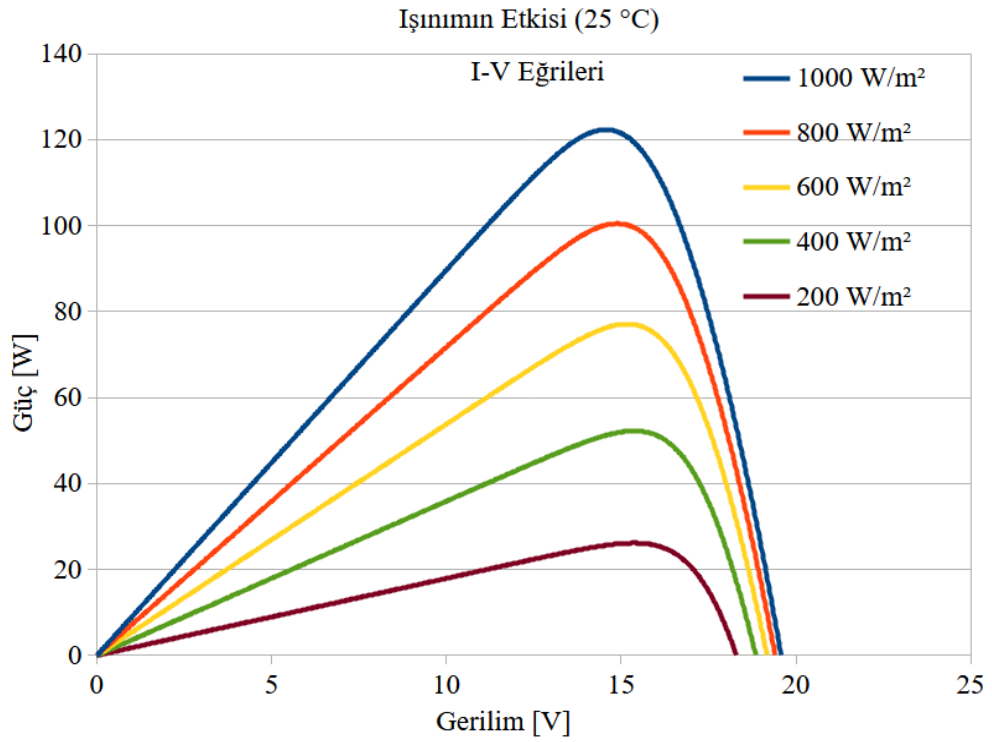
2.2 Işınım Seviyesinin Fotovoltaik Hücre Üzerindeki Etkisi

Güneş ışıınım seviyesi, fotovoltaik hücrelerin verimliliği ve enerji üretimi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Sahin ve Ozdemir, 2020). Güneş ışıınım seviyesi arttıkça, fotovoltaik hücrelerin elektrik üretim verimliliği genellikle artar. Yüksek ışıınım seviyesi etkisinde hücreler daha fazla foton alır ve bu da yarı iletken malzemenin temel enerji seviyesini arttırarak daha fazla elektron koparılmasına yol açar. Fotovoltaik hücrede oluşan ışık akımı (I_{ph}) ışık akımı ışıınım seviyesi (G) ve sıcaklığın (T) bir fonksiyonudur. Işık akımı, ışıınım seviyesi arttıkça artar. Işık akımının ışıınım seviyesi ve sıcaklıkla ilişkisini veren matematiksel ifade aşağıdaki gibidir;

$$I_{ph}(T, G) = \frac{G}{G_o} \cdot (I_{pho} + \mu I_s \cdot (T - T_o)) \quad (2.6)$$



Şekil 2.2. Işınım seviyesinin I-V eğrisine etkisi.



Şekil 2.3. Işınım seviyesinin P-V eğrisine etkisi.

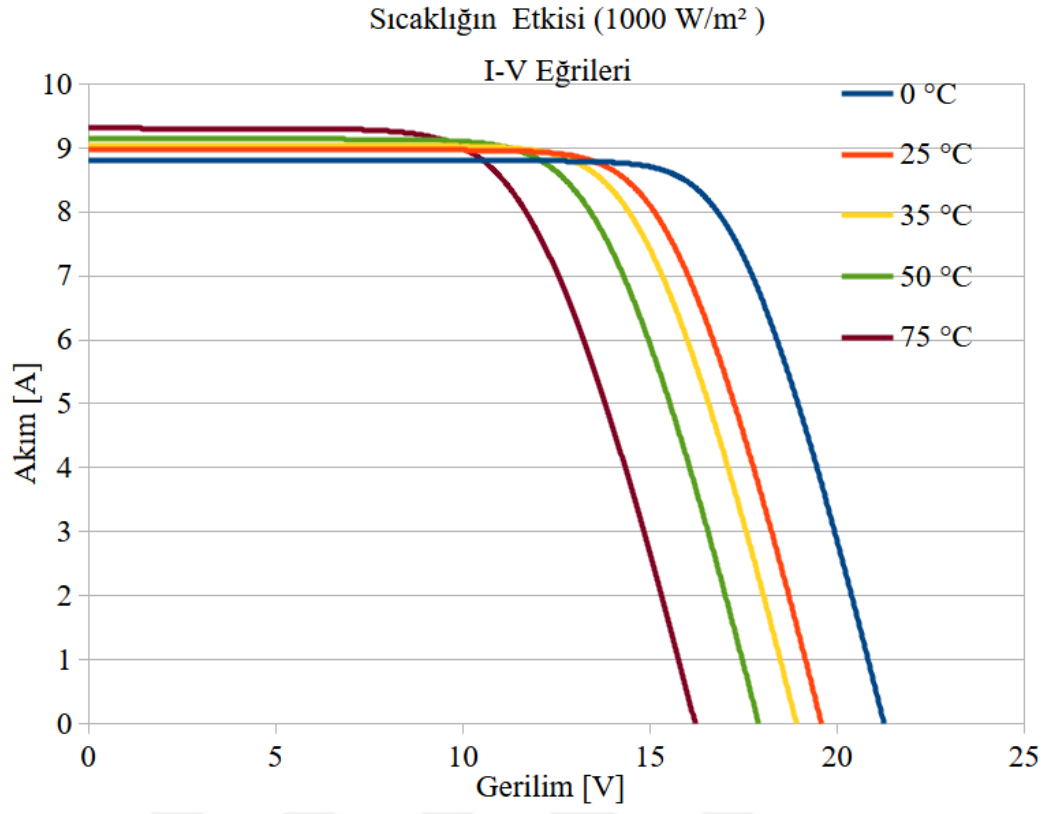
2.3 Sıcaklık Seviyesinin Fotovoltaik Hücre Üzerindeki Etkisi

Fotovoltaik hücrelerde sıcaklık arttıkça akım seviyesinin küçük bir miktar arttığı, hücre gerilim seviyesinin hücrenin matematiksel çözümlemede belirleyici olacak şekilde azaldığı gözlemlenmektedir. Referans sıcaklık seviyesi (T_o) ve operasyon sıcaklık seviyesi (T) arasındaki fark arttıkça da ışık akımı seviyesi artmaktadır (Zhao ve Zhang, 2019). Sıcaklığın akıma ve gerilime etkisi, μI_s ve μV_o sıcaklık katsayılarının değeri ve operasyon sıcaklığının (T) bir fonksiyonu olan aşağıdaki matematiksel ifadeler ile açıklanabilir;

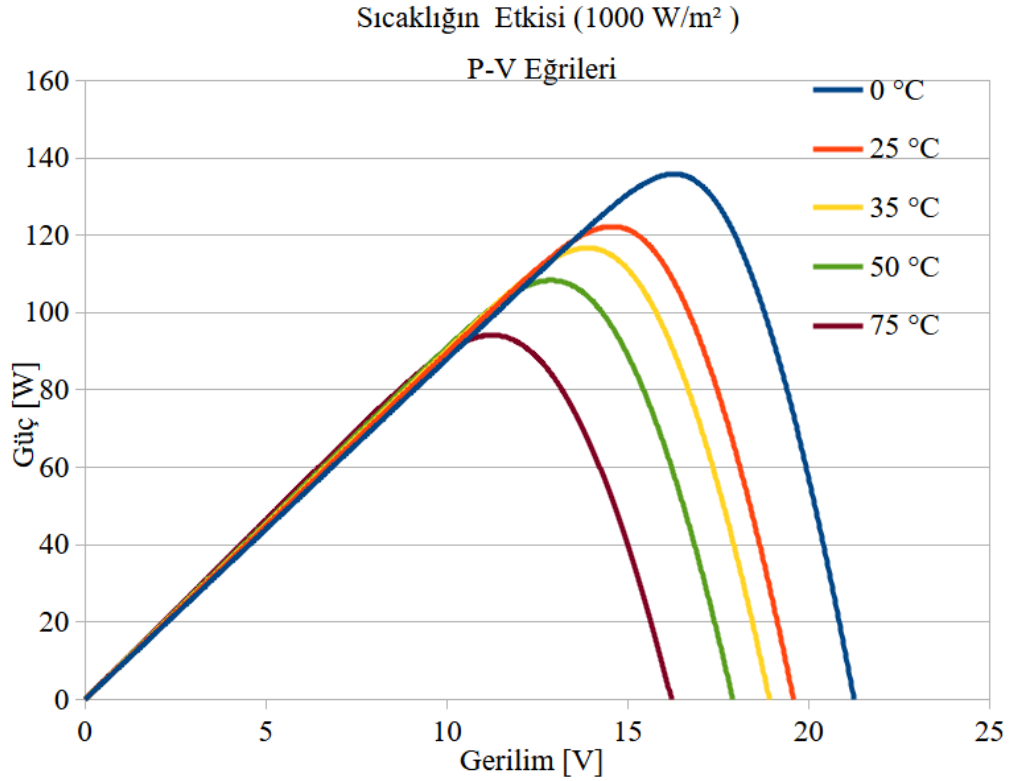
$$I_s(T, G) = \frac{G}{G_o} \cdot (I_{so} + \mu I_s \cdot (T - T_o)) \quad (2.7)$$

$$V_o(T) = (V_{oo} + \mu V_o \cdot (T - T_o)) \quad (2.8)$$

Denklem (2.7) kullanılarak yeni bir sıcaklık değerinde referans koşullardan yararlanılarak kısa devre akımının (I_s) o sıcaklıktaki yeni değeri bulunabilir. Aynı şekilde denklem (2.8) kullanılarak açık devre geriliminin (V_o) o sıcaklıktaki yaklaşık yeni değeri hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.4 Sıcaklık seviyesinin I-V eğrisine etkisi.



Şekil 2.5 Sıcaklık seviyesinin P-V eğrisine etkisi Sıcaklık seviyesinin P-V eğrisine etkisi.

2.4 Mevcutta Kullanılan Model ve Çözümlemeler

Bir fotovoltaiik hücre ya da güneş panelinin uygulama ve deneysel çalışmaları sırasında hangi akım ve gerilim değerlerini sağlayabileceğini önceden hesaplamak için, öncelikle eşdeğer devre denkleminde yer alan bilinmeyen parametrelerin sayısal ya da analitik yöntemler kullanılarak belirlenmesi gerekmektedir. Mevcut literatürde bu problemin çözümü için birçok farklı model ve sayısal yöntem geliştirilmiştir. Analitik yöntemler arasında beş parametrelili modeller, dört parametrelili modeller ve iki diyotlu modeller örnek olarak verilebilir.

Bir fotovoltaiik hücrenin eşdeğer devre denklemi, doğrusal olmayan bir matematiksel ifade olarak tanımlanır. Bu nedenle, beş parametrelili bir modelde her bir parametrenin bilinen beş bilinmeyenli denklemlerle aynı anda çözülmesi genellikle mümkün değildir. Bu problemin çözümü için

araştırmacılar, her bir parametrenin referans değerlerini dikkate alarak çeşitli sayısal yöntemler ve algoritmalar kullanmıştır. Örneğin, mevcut literatürde ışık akımının (I_{ph}) yaklaşık referans değeri, kısa devre akımı (I_s) olarak kabul edilmektedir. Ters doyma akımının (I_o) değeri genellikle 1.10^{-10} A olarak belirlenirken, seri iç direncin (R_s) referans değeri çoğu kaynakta 0,3–0,5 Ω (Celik ve Acikgoz, 2007) arasında değişmektedir. Paralel şönt direncinin (R_{sh}) ise 50-150 Ω arasında referans değerler aldığı görülmektedir.

Problemin sayısal olarak çözümüne yönelik örneklerden biri Newton-Raphson yöntemidir. Bu yöntemde, eşdeğer devre denklemlerinin birinci dereceden türevleri alınarak, bir x_0 referans matrisi ($x_0 = [I_{ph}, a_o, R_{so}, I_{oo}, R_{sh}]$) içerisine yerleştirilen fotovoltaik hücre parametrelerinin referans değerleri kullanılarak iterasyonlar gerçekleştirilebilmektedir. Lineer olmayan denklemlerin optimizasyonunda kullanılan GRG (Generalized Reduced Gradient) algoritması, bu problemin çözümünde araştırmacılar tarafından tercih edilen bir yöntemdir (Lo Brano ve Ciulla 2013). Aşağıda GRG yönteminin güneş paneli eşdeğer devre denklemi için kurgulanabilecek matematiksel sistem verilmiştir;

Eşitlikler;

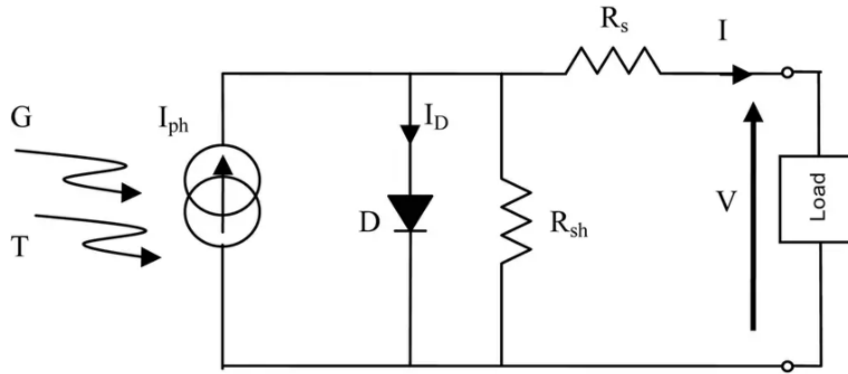
$$x_0 = [I_{ph}, a_o, R_{so}, I_{oo}, R_{sh}], \quad \text{Min } F(x)=0, \quad h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, K$$

Eşitsizlikler;

$$\text{Min } F(x) \leq 0, \quad 0,3 \leq x_0(4) \leq 0,5, \quad I_{sc} < x_0(1), \quad x_0(5) \leq 100$$

Yukarıdaki matematiksel ifadeler GRG yönteminin temel mantığını temsil etmektedir. Fotovoltaik panelin farklı operasyon şartlarındaki (açık devre $V = V_o$, kısa devre $I = I_s$ vb.) eşdeğer devre denklemleri burada minimize edilecek ve sıfıra eşitlenecek $F(x)$ ve $H(x)$ fonksiyonları yerine kullanılabilir. Ayrıca eşitsizlik sistemi olarak ışık akımının (I_{ph}) değerinin panelin kısa devre akımından (I_s) küçük olamayacağı örnek gösterilebilir. Diğer parametreler içinde sınırlayıcı eşitlik ve eşitsizlik sistemleri kurulursa yukarıdaki matematiksel ifadeler iterasyon yoluyla güneş panelinin beş parametresini tahmin etmek için kullanılabilir.

2.5 Beş Parametrelili Model



Şekil 2.6. Eşdeğer devre şeması. (electricistanbul.com, 2024)

Beş parametrelili eşdeğer devre modeli, iki diyotlu ve dört değişkenli modellerden farklı olarak paralel şönt direncinin (R_{sh}) etkisini de dikkate almaktadır. Şekil 1.1'deki eşdeğer devre şemasında görüldüğü gibi fotovoltaik hücrenin I-V değerlerine tüm parametreler etki etmektedir. Bu model bilinmeyen parametrelerin analitik olarak hesaplanması esasına dayanmaktadır. Beş parametrelili modelde modifiye edilmiş diyot katsayısının (a) referans değerinin bulunması için yine referans bir seri iç direnç (R_s) ve paralel şönt

direnci (R_{sh}) değerine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu modelde, modifiye edilmiş diyot katsayını (a) veren matematiksel ifade aşağıdaki gibidir;

$$a_o = \frac{V_m + I_m \cdot R_{so} - V_o}{\ln(I_s - \frac{V_m}{R_{sho}}) - \ln(I_s - \frac{V_o}{R_{sho}}) + (\frac{I_m}{I_s - \frac{V_o}{R_{sho}})}} \quad (2.9)$$

Daha sonra yukarıdaki denklemden hesaplanan a_o değerini kullanılarak ışık akımı (I_{ph}) ve ters doyma akımının (I_o) değerleri aşağıdaki matematiksel ifadeler kullanılarak hesaplanabilir;

$$I_{ph} = \left(1 - \exp\left(\frac{I_s R_{so}}{a_o}\right)\right) \cdot I_o - \left(\frac{I_s R_{so}}{R_{sho}}\right) - I_s \quad (2.10)$$

$$I_o = \left(I_s - \frac{V_o}{a_o}\right) \cdot \exp\left(\frac{-V_o}{a_o}\right) \quad (2.11)$$

Bu modelde hücre içindeki dirençleri hesaplamak için ise aşağıdaki matematiksel ifadeler kullanılmaktadır;

$$R_{so} = (R_{so} - (\frac{a_o}{I_o} \cdot)) \quad (2.12)$$

$$R_{sh} = R_{sho} \quad (2.13)$$

2.6 Geliştirilmiş Tek Diyotlu Beş Parametrelili Model

Fotovoltaik paneller, üreticileri tarafından üretim sonrası deneysel olarak açık devre gerilimi (V_o), maksimum güç noktası gerilimi (V_m), maksimum güç noktası akımı (I_m), kısa devre akımı (I_s) ve sıcaklık verimliliği gibi I-V eğrisindeki önemli parametrelerin değerleri belirlenmektedir. Bu spesifik değerler, fotovoltaik panelin elektriksel karakteristikleri olarak son kullanıcıyla paylaşılmaktadır. Bilimsel ve ticari çalışmalarda, bir fotovoltaik sistemin kurulumu öncesinde beklenen elektriksel performansın önceden hesaplanması büyük önem taşımaktadır (Duffie ve Beckman, 2013). Dolayısıyla, üretici tarafından sağlanan bu kısıtlı bilgilerle, kurulum veya bilimsel çalışmalar öncesinde hücrenin I-V eğrisi hakkında yorum yapmak oldukça zordur.

Fotovoltaik hücrenin eşdeğer devre denklemi (3.1), sistemden çekilen akım (I) ve buna karşılık gelen gerilim (V) ile birlikte beş bilinmeyen elektriksel parametre içermektedir. Bu parametreler; ışık akımı (I_{ph}), modifiye edilmiş diyot katsayısı (a), ters doyma akımı (I_o), paralel şönt direnci (R_{sh}) ve seri iç direnç (R_s) olarak sıralanabilir. Eşdeğer devre denklemi, lineer olmayan bir matematiksel ifade olduğundan analitik yöntemlerle çözülmesi karmaşık bir süreçtir. Bu beş parametrelili fotovoltaik hücre modeli için bu parametrelerin önceden bilinmesi durumunda, panelin deneysel çalışma sırasında sağlayabileceği akım (I) ve gerilim (V) değerleri kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmada, mevcut literatürdeki beş parametrelili fotovoltaik hücre modelinin çözümü için MATLAB yazılımı kullanılarak “Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model” adında yeni bir analitik yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, temel olarak yalnızca panel üreticisinin sağladığı elektriksel karakteristikleri (V_o , V_m , I_s , I_m) kullanarak beş parametreyi tahmin etmeye yönelik bir matematiksel algoritma önermektedir. MATLAB üzerinden gerçekleştirilen hesaplama ve çalışmalarda, eşdeğer devre denkleminin önceki bölümlerde bahsedilen hücrenin farklı operasyon koşullarındaki varyasyonları

oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni denklemlerden, hücrenin bilinmeyen parametreleri, her biri denklemin bir tarafında yalnız bırakılacak şekilde düzenlenmiş ve aşağıdaki denklemler elde edilmiştir:

$$f1 = 0 \Leftrightarrow I_{ph} = I_s + I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{I_s R_{sh}}{a}\right) - 1 \right) + \frac{I_s R_s}{R_{sh}} \quad (2.14)$$

$$f2 \Leftrightarrow 0 \Leftrightarrow a = \frac{V_o}{\frac{I_{ph}}{I_o} - \frac{V_o}{I_o R_{sh}} + 1} \quad (2.15)$$

$$f3 = 0 \Leftrightarrow I_o = \frac{(R_{sh} \cdot (I_{ph} - I_m) - I_m \cdot R_s - V_m)}{\exp\left(\frac{I_m R_s + V_m}{a}\right) \cdot R_{sh}} \quad (2.16)$$

$$f4 = 0 \Leftrightarrow R_{sh} = \frac{V_m \cdot a - I_m \cdot a \cdot R_s}{I_m \cdot a + \left(\exp\left(\frac{I_m R_s + V_m}{a}\right) \cdot I_o \cdot R_s \cdot I_m - \exp\left(\frac{I_m R_{sh} + V_m}{a}\right) \cdot I_o \cdot V_m \right)} \quad (2.17)$$

Yukarıda belirtilen denklemlerde görüldüğü üzere, beş parametrelili bir fotovoltaiik hücrenin bilinmeyen parametreleri eşitliklerin sol tarafında bırakılarak yalnız bırakılmıştır. Elde edilen bu denklemler, MATLAB yazılımına girilip analitik çözüm komutu (solve) kullanılarak çözülmeye çalışıldığında sanal sayılı bir çözüm kümesi elde edilmiştir. Bunun temel nedeni, üretici tarafından sağlanan hücrenin elektriksel karakteristiklerinin virgülden sonra ondalık hassasiyetinin tam olarak verilmemesidir. Bu durum, fotovoltaiik panelin I-V eğrisindeki açık devre gerilimi (V_o), maksimum güç noktası gerilimi (V_m), kısa devre akımı (I_s) ve maksimum güç noktası akımı (I_m) gibi önemli noktaların belirlenmesini zorlaştırmakta ve bu noktalara dayanan açık devre denklemlerinin analitik çözümlemesinin mümkün olmadığını göstermektedir. (Duffie ve Beckman, 2013).

Devam eden çalışmalarda, bilinmeyen beş parametreden biri olan ters doyma akımının (I_o) bilindiği varsayımı altında analitik çözümleme yapıldığında, kalan tüm bilinmeyen parametrelerin analitik olarak tespit edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgulardan hareketle, sıcaklık ile büyük ölçüde ilişkili olan modifiye edilmiş diyot katsayısı (a) ve ters doyma akımının (I_o) yaklaşık değerlerinin MATLAB ortamında belirlenmesi hedeflenmiştir. Fotovoltaik hücre üreticileri, hücrenin akım ve gerilim değerlerinin sıcaklıkla değişim katsayılarını (μI_s , μV_o) kullanıcılarla paylaşmaktadır. Bu değerler kullanılarak, fotovoltaik hücrenin farklı sıcaklık koşullarındaki (Örneğin; referans değerden ± 1 °C sapma) eşdeğer devresinden yola çıkarak farklı denklem sistemleri elde edilebilir. Örneğin, referans şartlarında ($T_o = 25$ °C, $G_o = 1000$ W/m²) çalışan bir fotovoltaik panel ve $T = 26$ (°C) sıcaklığı ve $G_o = 1000$ (W/m²) güneş ışınım değeri şartlarında çalışan bir fotovoltaik panelin revize edilmiş denklemleri aşağıda sunulmuştur:

$$T = T_o, G = G_o ;$$

$$f1 = 0 \Leftrightarrow I_{pho}(T, G) = I_{pho}(T, G) + I_o(T) \cdot \left(\exp \left(\frac{I_s(T, G) \cdot R_s}{a(T)} \right) - 1 \right) + \frac{I_s(T, G) \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.18)$$

$$f2 = 0 \Leftrightarrow a_o(T, G) = \frac{V_o(T)}{\frac{I_{pho}(T, G)}{I_o(T)} - \frac{V_o(T)}{I_o(T) \cdot R_{sh}(G)} + 1} \quad (2.19)$$

$$T = 26, G = G_o ;$$

$$f1' = 0 \Leftrightarrow I_{ph}(T, G) = I_s(T, G) + I_o(T) \cdot \left(\exp \left(\frac{I_s(T) \cdot R_s}{a(T)} \right) - 1 \right) + \frac{I_s(T) \cdot R_s}{R_{sh}(G)} \quad (2.20)$$

$$f2' = 0 \Leftrightarrow a(T) = \frac{V_o(T)}{\frac{I_{ph}(T,G)}{I_o(T)} - \frac{V_o(T)}{I_o(T).R_{sh}(G)} + 1} \quad (2.21)$$

Yukarıda sunulan denklem sisteminin ($F = [f1, f2, f1', f2']$) çözümü yapılırken, referans sıcaklık değerinin ± 1 °C olmak üzere $24^\circ\text{C} < T < 26^\circ\text{C}$ aralığında 20 farklı örnek sıcaklık alınmıştır. Alınan bu sıcaklıklar bir dizide toplanmıştır. (Örneğin; $T = [24, 24.1, 24.2, \dots, 25.9, 26]$). Dizideki elemanlar bir “for” döngüsü ile T_i olacak şekilde sırayla F denklem sistemine girilmiştir. Dörtlü bir denklem sistemi F , MATLAB yazılımında çözüldüğünde, bilinmeyen parametrelerden olan ışık akımının (I_{ph}) ve modifiye edilmiş diyot katsayısının (a) 20 farklı değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin aritmetik ortalaması alındıktan sonra bulunan ortalama modifiye edilmiş diyot katsayısının (a), referans değerlere oldukça yakın bir şekilde belirlendiği gözlemlenmiştir. Ancak, kalan üç parametrenin doğru bir şekilde çözülemediği tespit edilmiştir. Bu çözümleme, en az iki parametrenin gerçek değerlerinin yaklaşık olarak hesaplanmasını sağlamaktadır. Modelde, panel üreticisi tarafından sağlanan sıcaklık katsayılarının doğruluğu büyük önem taşımaktadır. Özellikle değeri doğrudan panelin sıcaklığıyla ilişkili olan modifiye edilmiş diyot katsayısının (a) doğru bir şekilde belirlenmesi, panelin diğer parametrelerinin çözümünü önemli ölçüde kolaylaştırmıştır.

MATLAB' da hesaplanan modifiye edilmiş diyot katsayısı (a_o) ve ışık akımı (I_{pho}) kullanılarak aşağıdaki denklemler kullanılarak referans bir ters doyma akımı (I_o) hesaplanmıştır. Elde edilen referans ters doyma akımı (I_o), panelin diğer verilerini elde etmek amacıyla dörtlü denklem sistemine (F) dahil edilmiştir. Bu denklem sistemi, referans şartlarında MATLAB ortamında çözümlenerek kalan tüm parametreler belirlenmiştir. Artık elde edilen parametrelerin farklı operasyon koşulları (sıcaklık, ışıınım) altındaki yeni değerleri referans şartlar kullanılarak aşağıdaki eşitlikler aracılığıyla yeniden hesaplanabilmektedir (Duffie ve Beckman, 2013);

$$I_{ph}(T, G) = \frac{G}{G_o} \cdot (I_{pho} + \mu I_s \cdot (T - T_o)) \quad (2.22)$$

Denklem (2.23)'de “ E_{g_o} ” değeri fotovoltaik hücre malzemesinin bant aralığı enerjisidir. Bant aralığı enerjisi (E_{g_o}) silikon esaslı hücrelerde için 1.12 eV, C sabiti ise 0,0002677'dir. Galyum Arsenit hücrelerde ise bant aralığı enerjisi (E_{g_o}) 1.35 eV, C sabiti ise 0,0003174 değerindedir (Messenger ve Ventre, 2004). Referans bant aralığı enerjisinden yola çıkarak hücrenin operasyon sıcaklığındaki yeni bant aralığı enerjisinin hesaplanmasını sağlayan eşitlik aşağıda verilmiştir;

$$\left(\frac{E_g}{E_{g_o}} = 1 - C \cdot (T - T_o) \right) \quad (2.23)$$

$$I_o(T) = I_{o_o} \cdot \frac{T^3}{T_o^3} \cdot \exp \left(\frac{E_{g_o}}{k \cdot T_o} - \frac{E_g}{k \cdot T} \right) \quad (2.24)$$

Denklem (2.25)'de görüldüğü gibi modifiye edilmiş diyot katsayısı (a) hücre sıcaklığıyla değişkenlik göstermektedir. Diyot faktörü (n^i) genellikle sıcaklık (T) ve ışınım seviyesinden (G) bağımsız olup genellikle referans değeri 1,5 kabul edilmektedir. Referans modifiye edilmiş diyot katsayısı (a) bulunduktan sonra denklem (2.26) kullanılarak istenilen çevresel şarttaki yeni değeri bulunabilir. Aşağıda diyot faktörünü (n^i) düzenleyip modifiye edilmiş diyot katsayısına dönüştüren eşitlik verilmiştir;

$$a_o = \frac{k.n^i.T_o.N_s}{q} \quad (2.25)$$

$$a(T) = a_o \cdot \frac{T}{T_o} \quad (2.26)$$

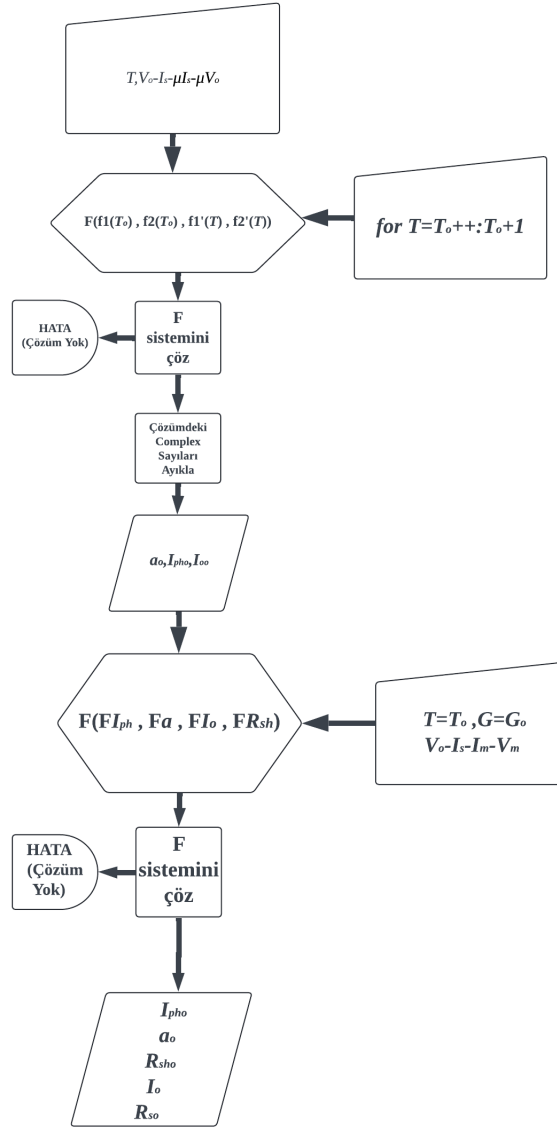
$$R_s = R_{so} \quad (2.27)$$

$$R_{sh}(G) = R_{sho} \cdot \left(\frac{G_o}{G} \right) \quad (2.28)$$

Referans ters doyma akımı (I_o) kullanılarak hesaplanan diğer parametreler yukarıdaki matematiksel eşitlikler kullanılarak farklı operasyon şartlarında (ışınım ve sıcaklık) bulunan parametreler revize edilebilir. Işık akımı (I_{ph}), sıcaklık ve ışıının bir fonksiyonu olup bunlarla doğru orantılıdır (Chin, vd., 2014). Denklem (2.22) kullanılarak ışık akımının (I_{ph}) operasyon şartlarındaki yeni değeri bulunmuştur. Işınım ve sıcaklık seviyesi arttıkça ışık akımının (I_{ph}) değeri artmaktadır. Modifiye edilmiş diyot katsayısı (a) ve ters doyma akımı (I_o) ise sadece sıcaklıkla doğru orantılıdır ve sıcaklık arttıkça değerleri artmaktadır. Denklem (2.25) ve denklem (2.26) kullanılarak modifiye edilmiş diyot katsayısının (a) yeni değeri hesaplanmıştır. Denklem (2.24) kullanılarak mevcut operasyon şartındaki ters doyma akımı (I_o) hesaplanmıştır. Denklem (2.27) 'de görüldüğü gibi seri iç direncin (R_s) hem sıcaklıktan hem de ışıının seviyesinden bağımsız olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla referans seri direnç ve seri direnç aynı değerdedir ($R_{so}=R_s$) (Duffie ve Beckman, 2013).

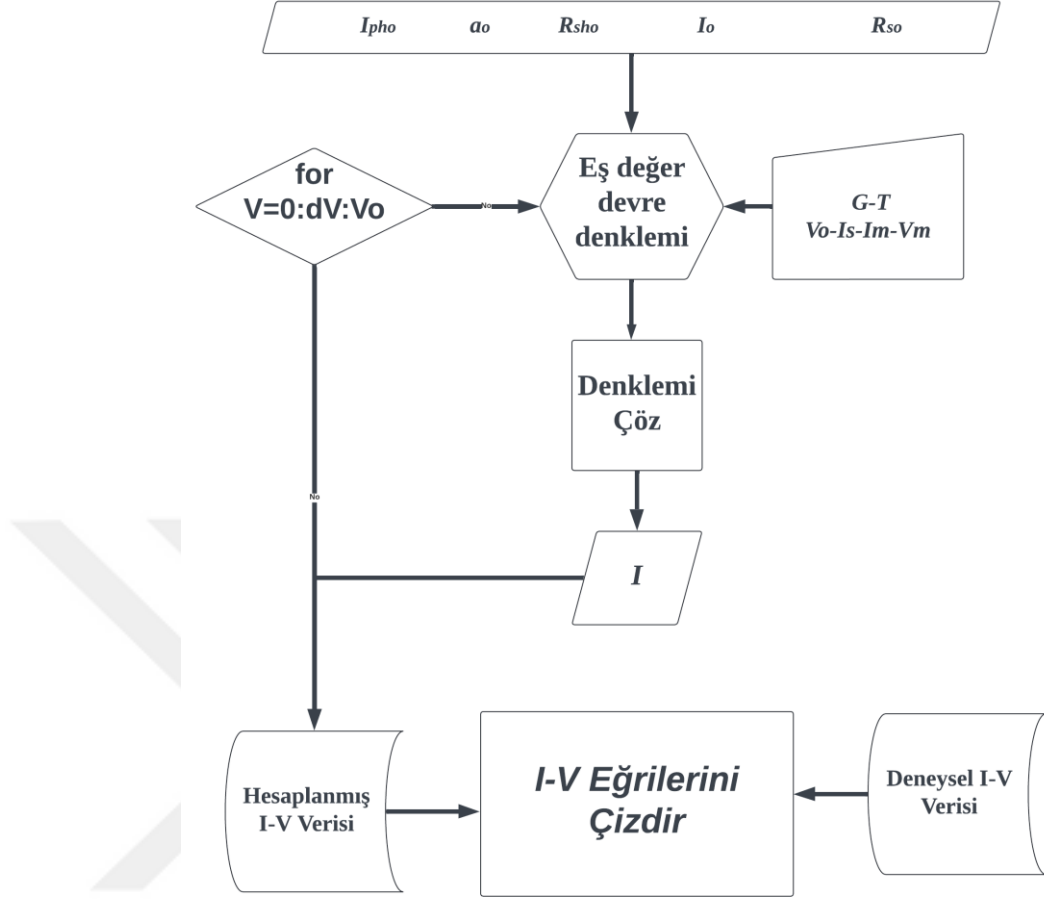
Denklem (2.28)'de anlaşıldığı gibi, paralel şönt direnci (R_{sh}) ışıınım seviyesi ile ters orantılıdır. Dolayısıyla ışıınım seviyesi arttıkça değeri düşmektedir.

Bu çalışmada önerilen geliştirilmiş beş parametreleri model, güneş panelinin üreticisi tarafından kullanıcıya verilen belirli noktalarındaki (V_o , I_s , I_m , V_m) akım ve voltaj değerlerini ve sıcaklık katsayılarını kullanarak çözümleme yapmayı sağlamaktadır. Bu çözümler yapılırken güneş panelinden elde edilen başka hiçbir deneysel veriye ihtiyaç duymamaktadır. Aşağıdaki algoritma akış diyagramında Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model algoritmasının nasıl hesaplama yaptığı gösterilmiştir;



Şekil 2.7. Bilinmeyen parametrelerin Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model algoritması kullanılarak hesaplanması.

Yukarıdaki algoritma akış diyagramında gösterildiği ve önceki bölümde açıklandığı gibi hesaplanan referans parametreler kullanılarak panelin I-V ve P-V eğrileri çizdirilmiştir. Öncelikle yeni sıcaklık ve ışıyım seviyesi için o şartlardaki açık devre gerilimi (V_o) denklem (2.8) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan yeni açık devre gerilimine (V_o) kadar eşdeğer devre denklemi $0 V - V_o$ aralığında gerilim değerleri verilerek tekrar çözdürölüp panelin akım değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 2.8. 25 °C ve 1000 W/m² ‘de hesaplanan parametreler kullanılarak I-V eğrilerinin çizdirilmesi.

3. BULGULAR

3.1 Modellerde Kullanılan Referans Değerler

Çalışmanın bu bölümünde, Bölüm 3'te tanımlanan geliştirilmiş beş parametrelili model ve bu modellerle hesaplanan fotovoltaiik hücrenin elektriksel karakteristikleri (I_{ph} , a , I_o , R_{sh} , R_s) fotovoltaiik hücrenin eşdeğer devre denklemi ile birleştirilmiştir. Bu denklemden elde edilen akım-gerilim verileri, öncelikle GRG (Generalized Reduced Gradient) sayısal yöntemi kullanılarak Kyocera KC175GHT-2 model güneş panelinin çözümleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Lo Brano ve Ciulla, 2013). Daha sonra, Plurawatt 130 model güneş panelinden I-V cihazı ile ölçülen deneysel veriler, mevcut literatürde bilinen beş parametrelili model hesaplamaları ve geliştirilmiş beş parametrelili model hesaplamaları karşılaştırılmıştır. Modellerin hesaplanması ve karşılaştırılması için MATLAB ve MS Excel yazılımları kullanılmıştır. Modellerin doğrulanması için kullanılan güneş panellerinin referans değerleri aşağıdaki tabloda sunulmuştur;

Tablo 3.1. Kyocera KC175GHT-2 ve Plurawatt 130 güneş paneli referans değerler tablosu.

	Kyocera KC175GHT-2	Plurawatt 130	Kaynak
G_o	1000 W/m ²	1018 W/m ²	Panel Etiketi
T_o	25	25	Panel Etiketi
I_s	8,09 A	8,75 A	Panel Etiketi
V_o	29,2 V	20,09 V	Panel Etiketi
V_m	23,6 V	15,92 V	Panel Etiketi
I_m	7,42 A	8,18 A	Panel Etiketi
N_s	48	36	Panel Etiketi
μV_o	- 0,1089 V	- 0,074 V	Panel Etiketi
μI_s	0,00317	0,0067	Panel Etiketi

3.2 Geliştirilmiş Beş Parametrelî Model ve GRG Yönteminin Karşılaştırılması

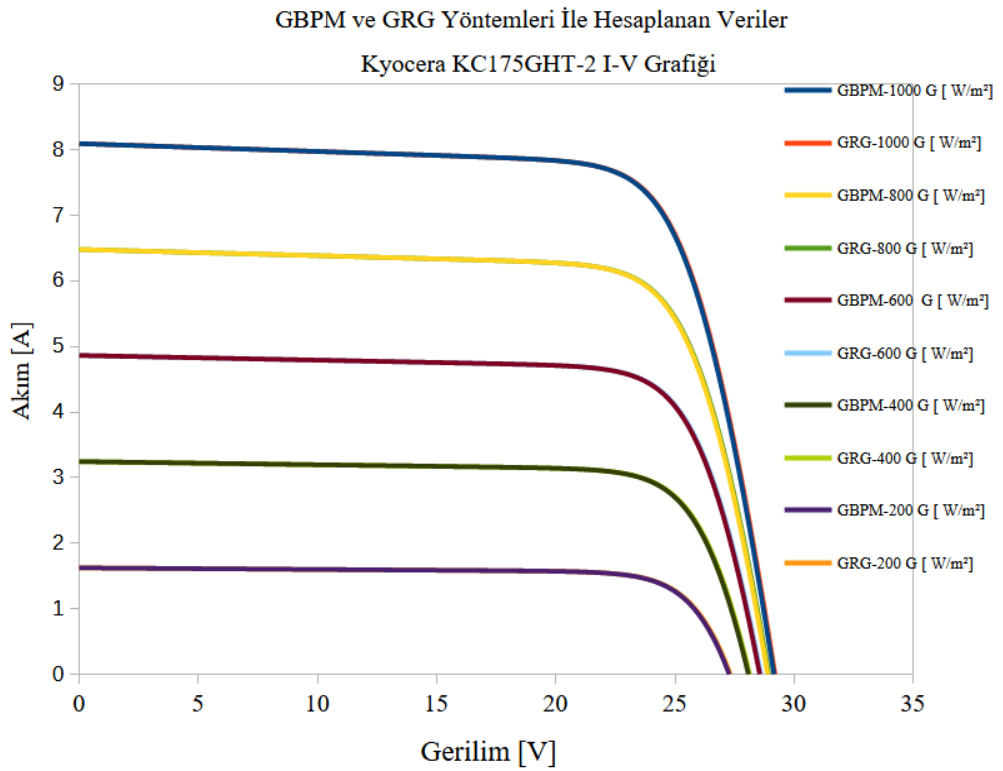
Bu bölümde, Kyocera KC175GHT-2 model, 48 hücreli (Lo Brano ve Ciulla, 2013) bir güneş panelinin, GBPM ve GRG yöntemleri kullanılarak bilinmeyen parametreleri hesaplanmıştır. Geliştirilmiş Beş Parametrelî model analitik ve sayısal olarak hibrit bir çözüm yaklaşımı sunarken, GRG Yöntemi problemin çözümünde sayısal bir yöntem uygulamaktadır (Lo Brano ve Ciulla, 2013). Her iki çözüm yönteminin sonuçları, elde edilen parametrelerin eşdeğer devre denklemlerinde yerlerine yerleştirilmesiyle güneş panelinin I-V ve P-V eğrileri çizilmiştir. Modellerin çözümü sonucunda elde edilen parametreler, her iki yöntem için aşağıdaki tabloda sunulmuştur;

Tablo 3.2. Kyocera KC175GHT-2 Güneş Panelinin, GRG Yöntemi ve Geliştirilmiş Beş Parametrelî Model ile hesaplanan parametreleri.

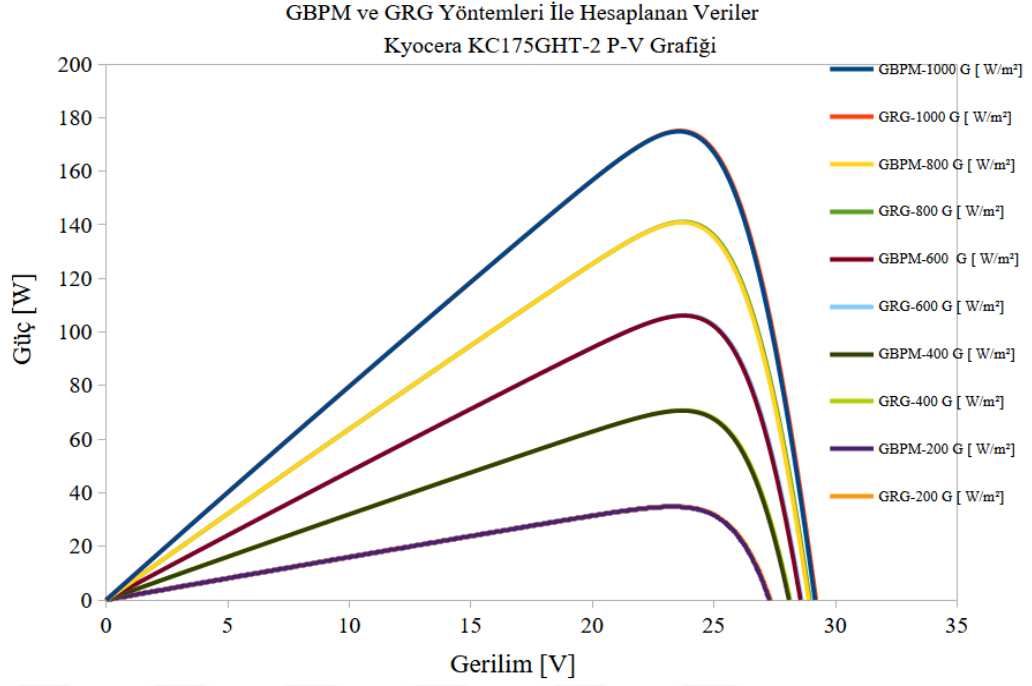
Kyocera KC175GHT-2		
Güneş Paneli Parametreleri	GBPM Yöntemi	GRG Yöntemi
Işık akımı (I_{ph})	8,1174 A	8,11754 A
Modifiye edilmiş diyot katsayısı (a)	1,1686 V	1,1674 V
Ters doyma akımı (I_o)	$1,1376 \cdot 10^{-10}$ A	$1,066 \cdot 10^{-10}$ A
Seri iç direnç (R_s)	0,2828	0,2836
Paralel şönt direnç (R_{sh})	83,5834	83,3

Yukarıdaki tabloda verilen değerler kullanılarak her iki modelin farklı ışınım ve sıcaklık değerlerindeki akım ve gerilim değerleri Bölüm 2’de verilen denklemler kullanılarak ve şekil (2.28)’deki algoritma akış şemasına göre hesaplanmıştır. Tabloda görüldüğü gibi modellerden hesaplanan parametreler neredeyse aynıdır. Hesaplanan parametreler kullanılarak her bir model için referans bir açık devre gerilimi (V_o) hesaplanmıştır. Hesaplanan açık devre

gerilimi (V_o) değerinde sonlanacak şekilde 0 V değerinden başlanarak, bir “for” döngüsü ile eşdeğer devre denklemine 100 adet gerilim değeri verilmiş ve gerilim değerlerine karşılık gelen akım değerleri hesaplanmıştır. Her iki modelden de elde edilen akım (I) ve gerilim (V) verileri aynı grafikte gösterilerek karşılaştırma yapılmıştır. Aşağıda, modellerden elde edilen I-V ve P-V grafikleri verilmiştir;



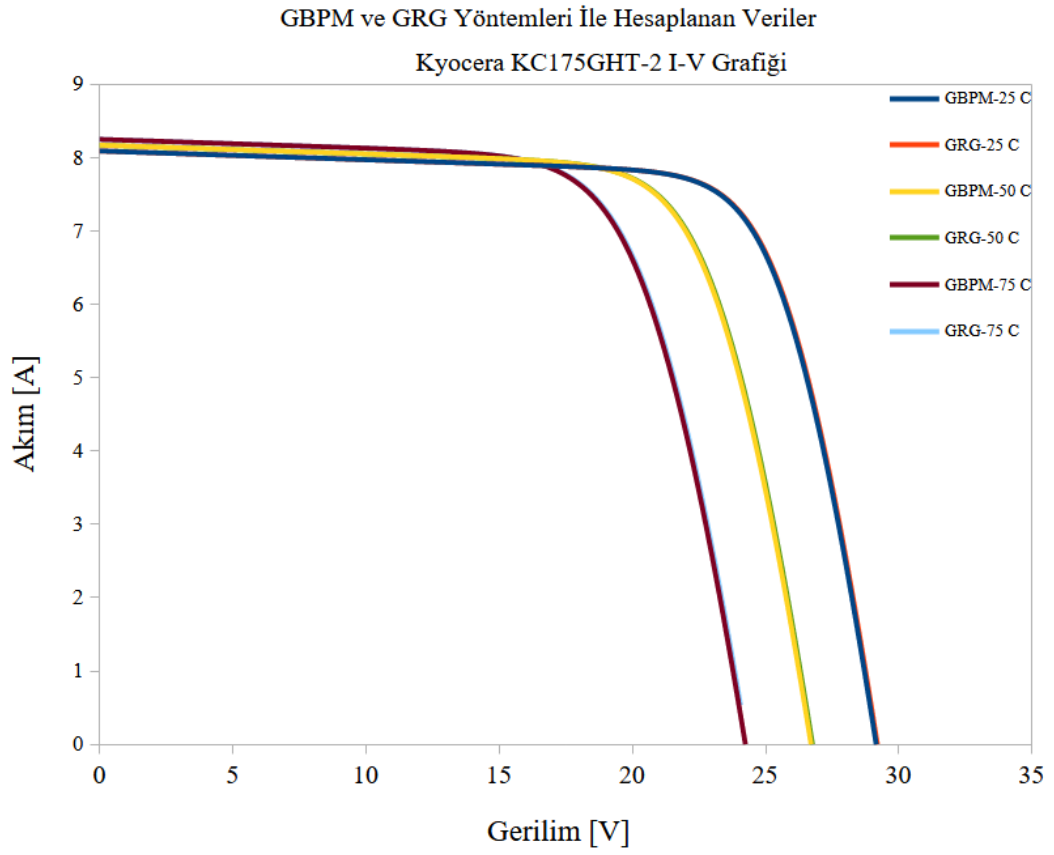
şekil 3.1. 25 °C ‘de, farklı ışınım değerlerinde GBPM ve GRG yöntemi ile elde gerilim ve akım değerleri.



Şekil 3.2. 25 °C ‘de farklı ışıınım değerlerinde GBPM ve GRG yöntemi ile elde gerilim ve güç değerleri.

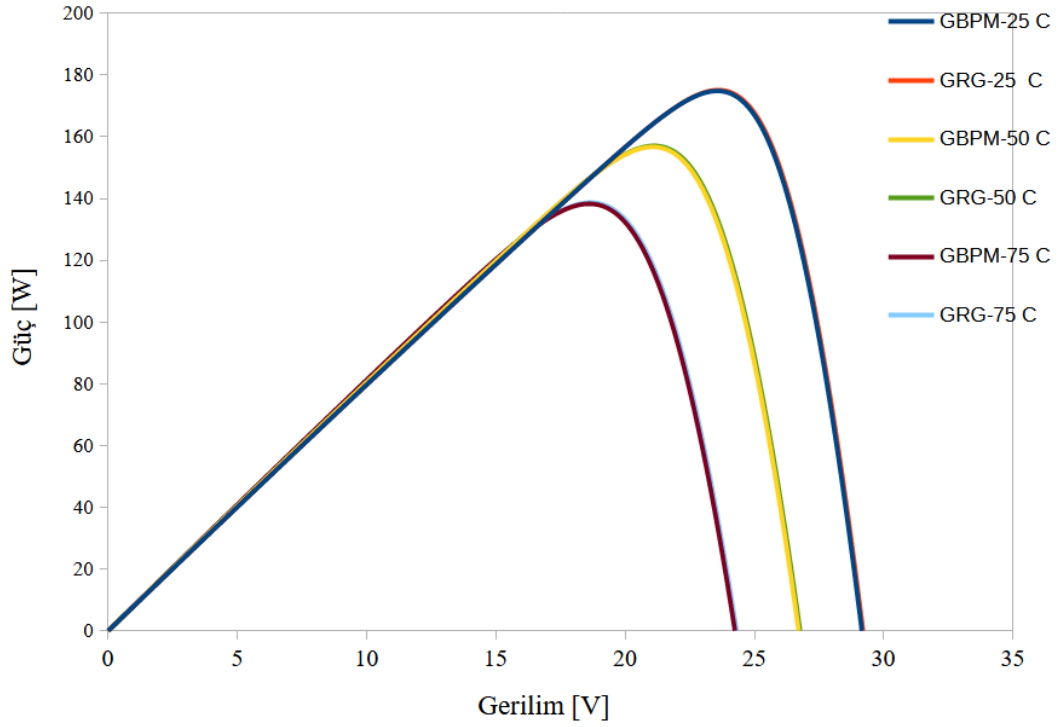
Tablo 3.3. Kyocera KC175GHT-2 Güneş Panelinin, farklı ışıınım değerlerinde GBPM ve GRG Yöntemi kullanılarak elde edilen akım ve gerilim değerleri.

	V_o (V)		I_s (A)		I_m (A)		V_m (V)	
G [W/m²]	GBPM	GRG	GBPM	GRG	GBPM	GRG	GBPM	GRG
1000	29,15	29,2	8,09	8,09	7,420	7,40	23,55	23,6
800	28,89	28,9	6,476	6,47	5,958	5,93	23,63	23,3
600	28,55	28,6	4,86	4,85	4,483	4,44	23,65	22,97
400	28,08	28,1	3,242	3,23	2,99	2,96	23,54	22,5
200	27,27	27,3	1,622	1,61	1,484	1,48	23,41	21,7



Şekil 3.3. 1000 W/m² 'de farklı sıcaklık değerlerinde GBPM ve GRG yöntemi ile elde gerilim ve akım değerleri.

GBPM ve GRG Yöntemleri İle Hesaplanan Veriler
Kyocera KC175GHT-2 P-V Grafiği



Şekil 3.4. 1000 W/m²' de farklı sıcaklık değerlerinde GBPM ve GRG yöntemi ile elde gerilim ve güç değerleri.

Tablo 3.4. Kyocera KC175GHT-2 güneş panelinin, farklı sıcaklık değerlerinde GBPM ve GRG Yöntemi kullanılarak elde edilen akım ve gerilim değerleri.

T	V_o (V)		I_s (V)		I_m (A)		V_m (V)	
°C	GBPM	GRG	GBPM	GRG	GBPM	GRG	GBPM	GRG
25	29,152	29,2	8,09	8,09	7,4206	7,403	23,557	23,6
50	26,7	26,47	8,169	8,169	7,446	7,442	21,04	20,97
75	24,242	23,75	8,248	8,248	7,428	7,44	18,61	18,42

3.3 Geliştirilmiş Beş Parametrelili ve Beş Parametrelili Modellerin Karşılaştırılması

Bu bölümde, Plurawatt model, 36 hücreli bir güneş panelinin, Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model algoritması ve Beş Parametrelili Model kullanılarak bilinmeyen parametreleri hesaplanmıştır. Hem geliştirilmiş beş parametrelili hem de beş parametrelili model bilinmeyen parametrelerin bulunması için analitik bir yaklaşım kullanmaktadır. Her iki çözüm yönteminin sonuçları, elde edilen parametrelerin eşdeğer devre denklemlerinde yerlerine yerleştirilmesiyle güneş panelinin I-V ve P-V eğrileri çizilmiştir. Modellerden hesaplanan akım ve gerilim değerleri güneş paneli üzerinden I-V cihazı kullanılarak ölçülen deneysel veriler ile karşılaştırılıp model ve deneysel veriler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki tabloda panel üzerinden I-V cihazı ile ölçülen akım ve gerilim değerleri verilmiştir;

Tablo 3.5. Plurawatt 130 güneş paneli üzerinden ölçülen deneysel veriler.

Deneysel					
$G [W/m^2]$	$T [^{\circ}C]$	$V_o (V)$	$I_s (A)$	$V_m (V)$	$I_m (A)$
1063	34	19,46	9,602	14,06	8,84
877	43	18,514	7,952	14,45	5.5148
763	42	18,615	6,904	14,02	6,388
661	40	18,264	5,886	14,07	5,406
388	24	19,242	3,471	15,59	3,226

3.3.1 Beş Parametrelili Model Bulguları

Tablo 3.6. Plurawatt güneş panelinin Beş Parametrelili Model ile hesaplanan akım ve gerilim verileri.

Beş Parametrelili Model					
G [W/m ²]	T [°C]	V_o (V)	I_s (A)	V_m (V)	I_m (A)
1063	34	19,44	9,313	15,10	8,72
877	43	18,636	7,698	15,07	5,5148
763	42	18,615	6,699	14,53	6,188
661	40	18,533	5,804	14,52	5,372
388	24	19,242	3,394	14,99	3,182

3.3.2 Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model Bulguları

Bu bölümde, Plurawatt güneş panelinin referans değerleri kullanılarak GBPM algoritması ile panelin bilinmeyen parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen parametreler, Bölüm 3’de verilen denklemler kullanılarak, I-V cihazında ölçülen koşullarla uyumlu hale getirilecek şekilde revize edilmiştir. Aşağıdaki tabloda, farklı operasyon koşullarında güneş panelinin parametrelerinin değerleri sunulmuştur;

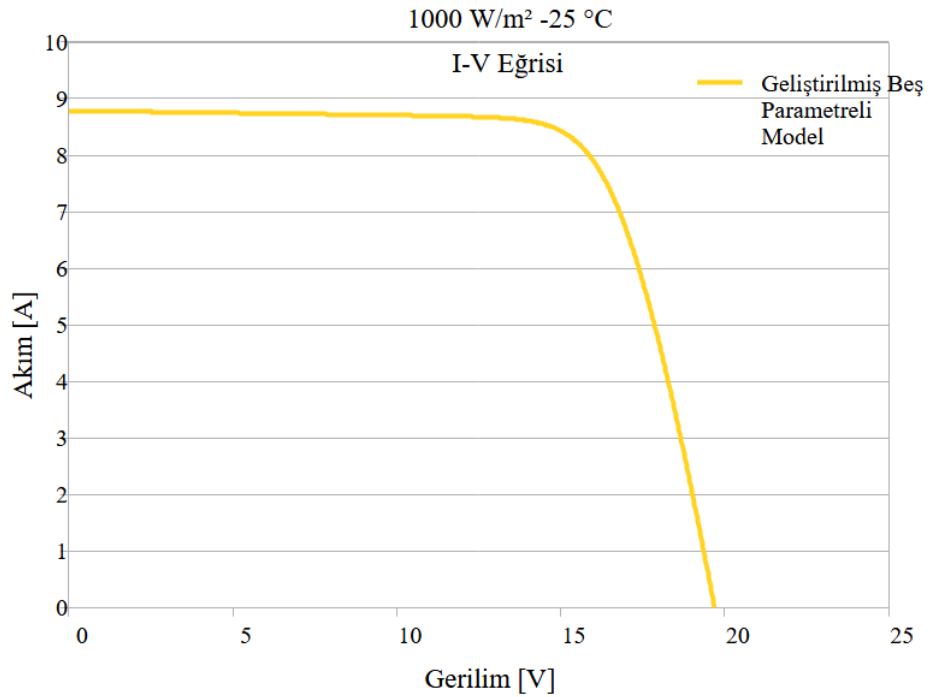
Tablo 3.7. Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model ile farklı operasyon şartlarında hesaplanan parametreler.

Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model						
$G \text{ [W/m}^2\text{]}$	$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$I_{ph} \text{ (A)}$	$a \text{ (V)}$	$I_o \text{ (A)}$	$R_s \text{ (}\Omega\text{)}$	$R_{sh} \text{ (}\Omega\text{)}$
1000	25	8,8019	0,7514	$3,60 \cdot 10^{-10}$	0,2367	126,9
1063	34	9,4205	0,774	$1,56 \cdot 10^{-10}$	0,2367	119,3
877	43	7,825	0,7967	$6,23 \cdot 10^{-10}$	0,2367	144,7
763	42	6,8028	0,7942	$5,36 \cdot 10^{-10}$	0,2367	166,3
661	40	5,8845	0,7892	$3,95 \cdot 10^{-10}$	0,2367	191,9
388	24	3,4125	0,7488	$3,04 \cdot 10^{-10}$	0,2367	327,08

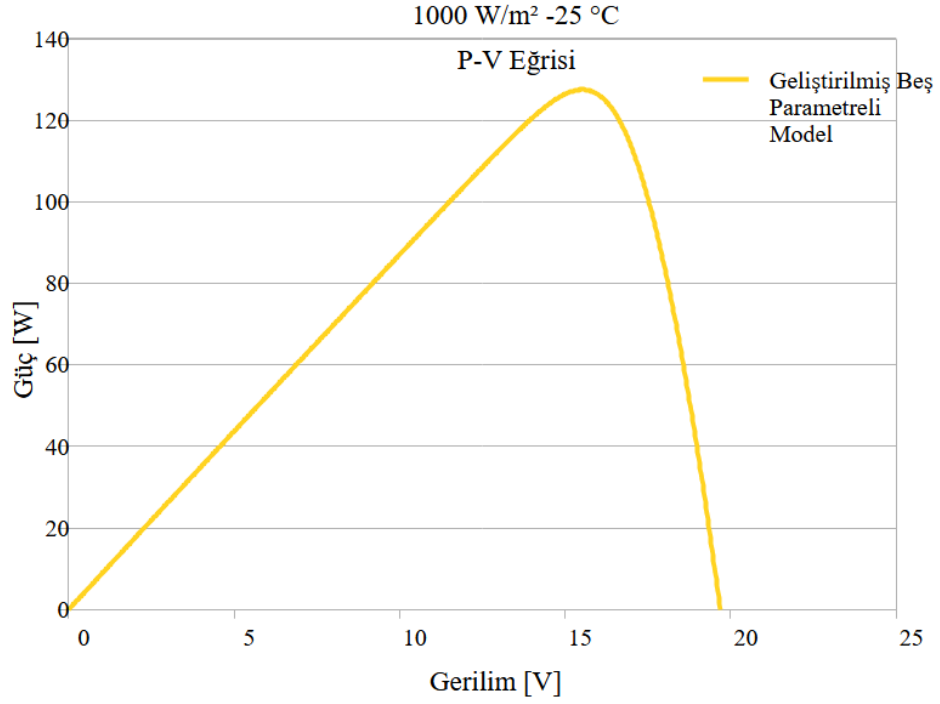
Yukarıdaki tablodan anlaşılacağı üzere, sıcaklık arttıkça modifiye edilmiş diyot katsayısı (a), ters doyma akımı (I_o) ve ışık akımının (I_{ph}) değerleri artmaktadır. Ayrıca, ışıyım değeri yükseldikçe ışık akımının (I_{ph}) değeri artmakta, ancak paralel şönt direnci (R_{sh}) azalmaktadır. Sonuç olarak, modifiye edilmiş diyot katsayısı (a) ve ters doyma akımı (I_o) sıcaklıkla ilişkili olup aralarında doğru orantı vardır. Işık akımı (I_{ph}) hem sıcaklıkla hem de ışıyım değeri ile doğru orantılıdır. Paralel şönt direnci (R_{sh}) ise ışıyım değeri ile ters orantılı olup sıcaklıktan bağımsızdır. Seri iç direnç (R_s) ise sıcaklık ve ışıyım değerinden bağımsızdır. Farklı koşullar için hesaplanan bu parametreler eşdeğer devre denkleminde yerine konulup hücrenin o şartlardaki V_o , I_s , I_m , V_m değerleri hesaplanabilir. Aşağıdaki tabloda hesaplanan değerler gösterilmiştir;

Tablo 3.8. Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model ile farklı operasyon şartlarında hesaplanan akım ve gerilim değerleri.

Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model					
G [W/m ²]	°C	V_o (V)	I_s (A)	V_m (V)	I_m (A)
1000	25	19,688	8,786	15,65	8,143
1063	34	19,20	9,402	15,10	8,63
877	43	18,514	7,812	14,45	7,301
763	42	18,464	6,793	14,53	6,388
661	40	18,470	5,877	14,52	5,595
388	24	19,039	3,410	15,92	3,217



Şekil 3.5. Plurawatt 130 Paneli için 1000 W/m² ve 25 °C’ de GBPM yöntemi ile elde edilen gerilim ve akım değerleri.



Şekil 3.6. Plurawatt 130 paneli için 1000 W/m² ve 25 °C’de GBPM yöntemi ile elde edilen gerilim ve güç değerleri.

3.4 Modeller ve Deneysel Verilerin Doğrulanması

Bu çalışmada, deneysel olarak elde edilen I-V datası; geliştirilmiş beş parametrelî model ve beş parametrelî modelden hesaplanan verilerle karşılaştırılıp doğrulukları araştırılmıştır. Hesaplanan ve ölçülen deneysel veriler karşılaştırılırken istatistiksel matematikte sıklıkla kullanılan RMSE (Root Mean Squared Error) yöntemi ve R^2 yöntemleri kullanılmıştır. RMSE yöntemi, tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar uzak olduğunu ölçmek için kullanılan bir hata metriğidir. RMSE, denklem (3.1)’de görüldüğü gibi, özellikle regresyon analizlerinde ve tahmin modellerinin doğruluğunu değerlendirmede yaygın olarak kullanılır. RMSE hesaplama adımları aşağıdaki gibidir;

•**Hata Hesaplama:** Modelin tahmin ettiği değerlerden gerçek değerler çıkarılır. Bu, her bir tahmin için hatayı (residual) verir.

•**Kare Alma:** Her bir hatanın karesi alınır, böylece negatif değerler pozitif hale gelir ve büyük hatalar daha fazla ağırlık kazanır.

•**Ortalama Alma:** Tüm kare hataların ortalaması alınır.

•**Karekök Alma:** Sonuç olarak elde edilen ortalamanın karekökü alınır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I'_i)^2}{n}} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki matematiksel ifadede;

I_i = Deneyisel olarak elde edilen akım verisi

I'_i = Modelden hesaplanan akım verisi

n = Örnekleme sayısı

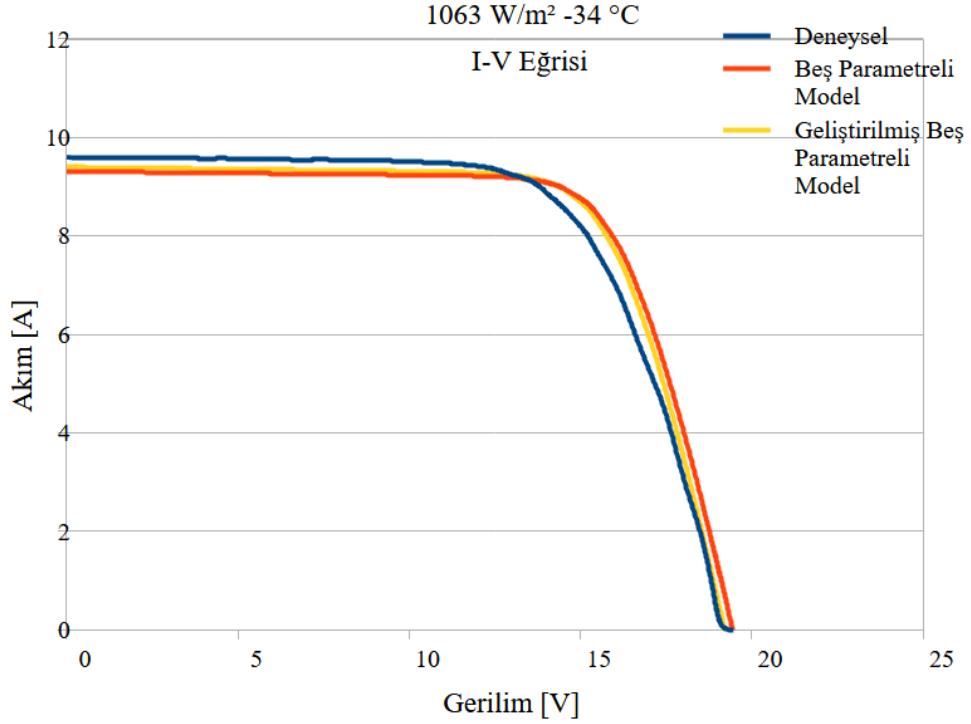
R-kare (R^2) yöntemi, istatistikte bir modelin veriye ne kadar iyi uyduğunu ölçen bir istatistiksel değerlendirme aracıdır. Genellikle doğrusal regresyon modelleri ve çoklu regresyon analizlerinde kullanılır. R-kare bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini gösteren bir orandır ve "determinasyon katsayısı" olarak da bilinir. Denklem (3.2)'de hesaplaması verilen R-kare (R^2) yöntemi, doğrusal regresyon modellerinin başarısını değerlendirmede yaygın olarak kullanılır. Aşağıda determinasyon katsayısını veren matematiksel ifade verilmiştir;

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Toplam Hataların Karesi}}{\text{Tüm Değerlerin Karesi}} \quad (3.2)$$

R^2 değeri, 0 ve 1 arasında olan bir değerdir. Değerin sıfır olması fotovoltaiik hücre modeli hesaplamalarının, deneysel verileri açıklayamadığını göstermektedir. R^2 değerinin bir ve bire yakın olması modelin, deneysel verilerdeki tüm değışiklikleri çok başarılı bir şekilde açıkladığını göstermektedir.

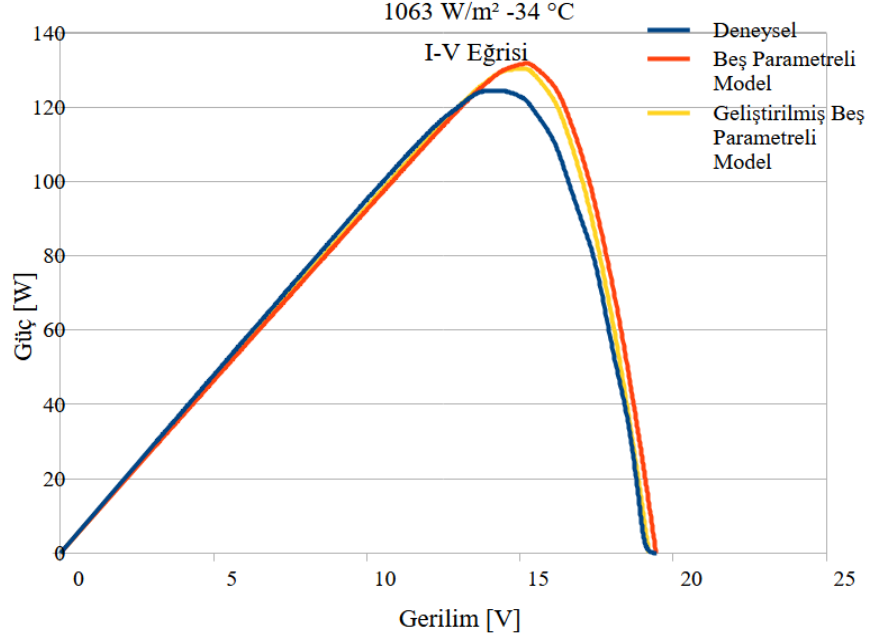
Tablo 3.9. Modellerin, Plurawatt deneysel verileri ile arasındaki RMSE ve R^2 değeri.

Şartlar		RMSE Değerleri		R^2	
Işınım (W/m ²)	Sıcaklık (°C)	GBPM	BPM	GBPM	BPM
1063	34	0,31	0,52	%99	%97,9
877	43	0,22	0,33	%99,3	%98,3
763	42	0,186	0,178	%99,2	%99,3
661	40	0,385	0,322	%96,2	%96,9
388	24	0,081	0,131	%99,3	%99,8



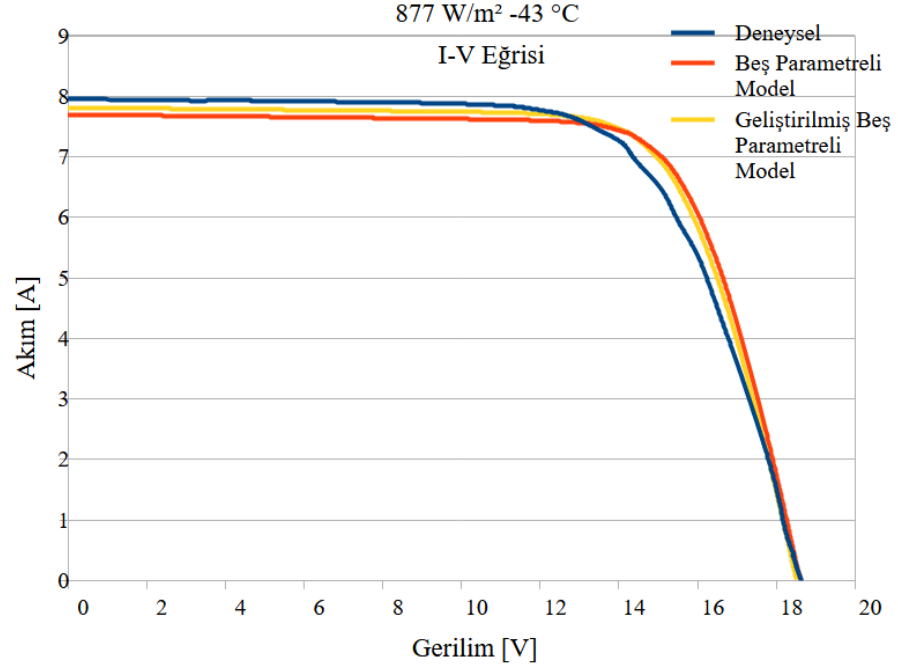
Şekil 3.7 1063 W/m² ve 34 °C’ de gerilim ve akım değerleri.

Fotovoltaik panelin 1063 W/m² ve 34 °C’ de ki deneysel verileri ile; geliştirilmiş beş parametrelili model ve beş parametrelili modelin çözümlemesinden elde edilen veriler şekil 3.7’de ki gibi, I-V eğrisi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneysel ve modellerin çözümlemesinden elde edilen sonuçlar kullanılarak veriler arasındaki RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrelili model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,22 olarak hesaplanırken, beş parametrelili model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,5 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda; GBPM’nin, BPM’e göre daha iyi bir sonuç verdiği gözlenmiştir. Modellerin R-kare (R^2) yöntemi ile yapılan karşılaştırmalarında GBPM’in R^2 değeri %95, BPM’in ise %95 olarak hesaplanmıştır (bkz. Tablo 4.2). Şekil 3.8’de modellerden ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlara göre P-V panelin P-V eğrileri gösterilmiştir.



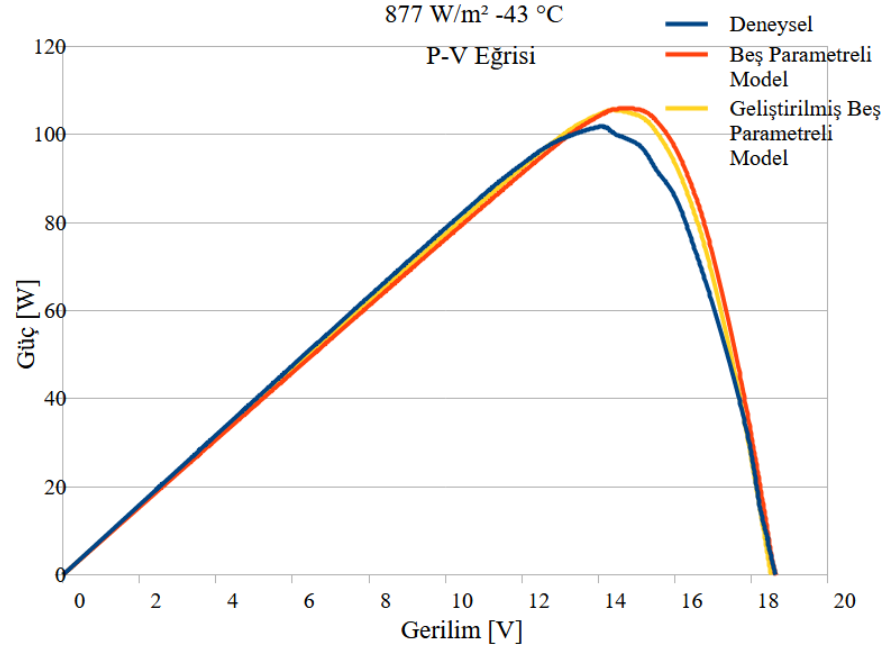
Şekil 3.8 1063 W/m² ve 34 °C’ de gerilim ve güç değerleri.

Şekil 3.8’de gösterilen P-V eğrilerinden yola çıkarak, bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 4,62 olarak hesaplanırken, beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 8,5 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda; GBPM’nin, BPM’e göre daha az hata oranı verdiği gözlenmiştir.



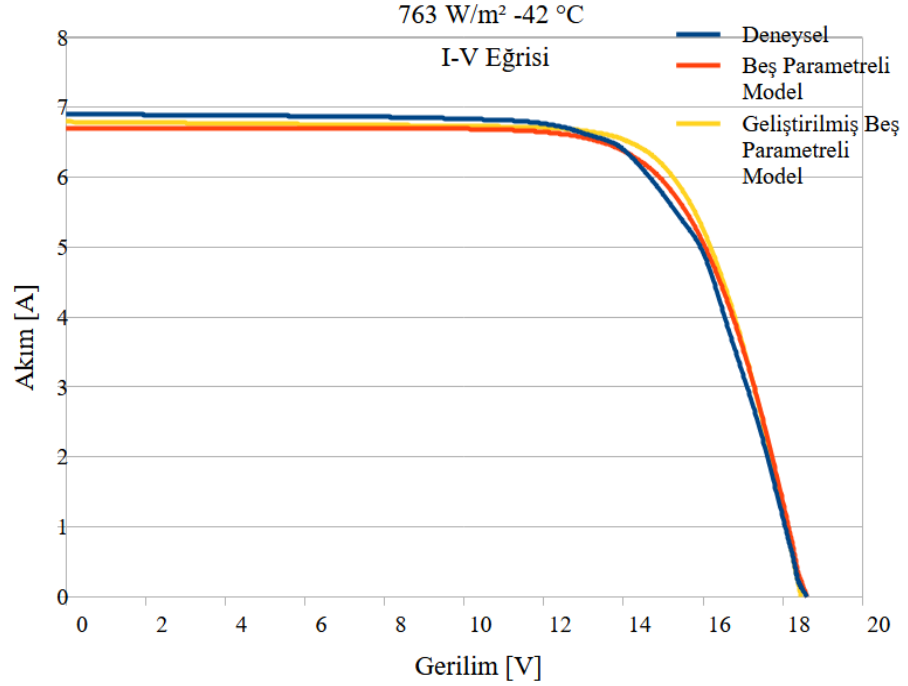
Şekil 3.9 877 W/m² ve 43 °C’ de gerilim ve akım değerleri.

Fotovoltaik panelin 877 W/m² ve 43 °C’ deki deneysel verileri ile; geliştirilmiş beş parametrel model ve beş parametrel modelin çözümlemesinden elde edilen veriler şekil 3.9’de ki gibi, I-V eğrisi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneysel ve modellerin çözümlemesinden elde edilen sonuçlar kullanılarak veriler arasındaki RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,22 olarak hesaplanırken, beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,33 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda; GBPM’nin, BPM’e göre daha iyi bir sonuç verdiği gözlenmiştir. Modellerin R-kare (R^2) yöntemi ile yapılan karşılaştırmalarında GBPM’in R^2 değeri %95, BPM’in ise %95 olarak hesaplanmıştır (bkz. Tablo 3.9). Şekil 3.10’de modellerden ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlara göre P-V panelin P-V eğrileri gösterilmiştir.



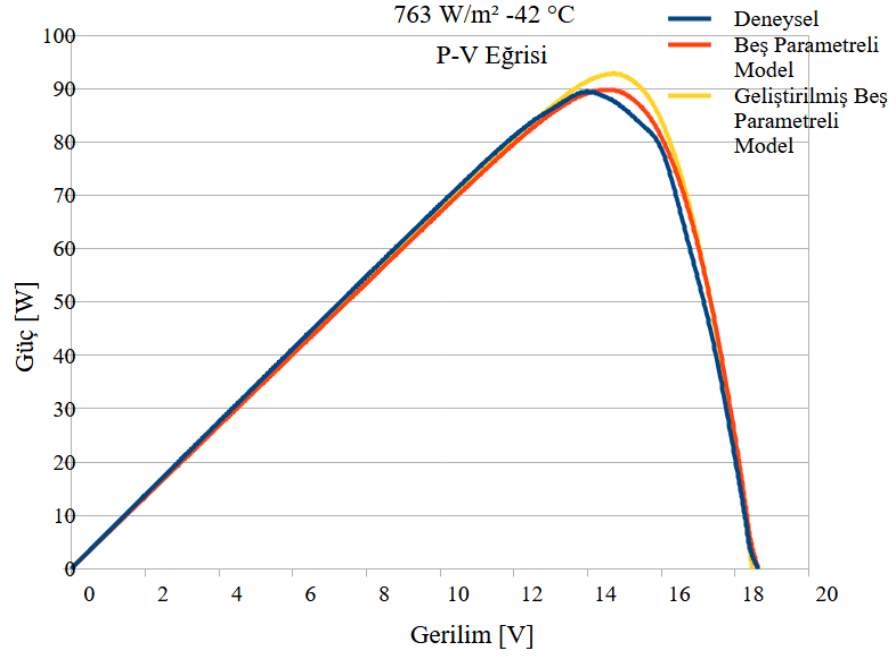
Şekil 3.10 877 W/m² ve 43 °C’ de gerilim ve güç değerleri.

Şekil 3.10’ de gösterilen P-V eğrilerinden yola çıkarak, bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 3,15 olarak hesaplanırken, beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 4,68 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda; GBPM’nin, BPM’e göre daha az hata oranı verdiği gözlenmiştir.



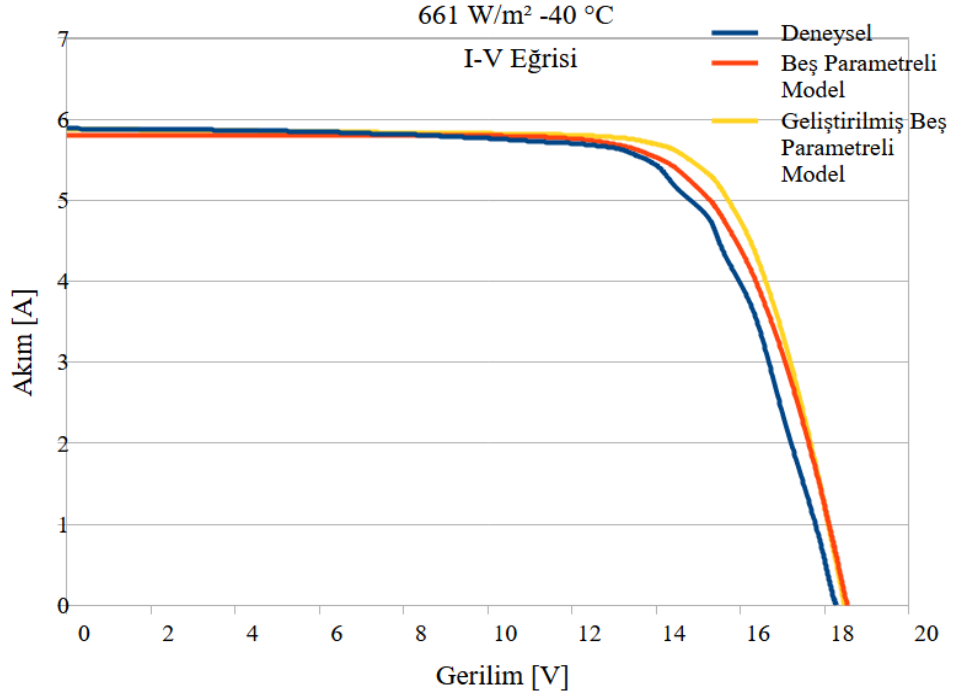
Şekil 3.11 763 W/m² ve 42 °C’ de gerilim ve akım değerleri.

Fotovoltaik panelin 763 W/m² ve 42 °C’ de ki deneysel verileri ile; geliştirilmiş beş parametrel model ve beş parametrel modelin çözümlemesinden elde edilen veriler Şekil 3.11’de ki gibi, I-V eğrisi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneysel ve modellerin çözümlemesinden elde edilen sonuçlar kullanılarak veriler arasındaki RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,186 olarak hesaplanırken, beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,178 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda; GBPM’nin, BPM ile neredeyse aynı sonuçları verdiği gözlenmiştir. Modellerin R-kare (R^2) yöntemi ile yapılan karşılaştırmalarında GBPM’in R^2 değeri %95, BPM’in ise %95 olarak hesaplanmıştır (bkz. Tablo 3.9). Şekil 3.12’de modellerden ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlara göre P-V panelin P-V eğrileri gösterilmiştir.



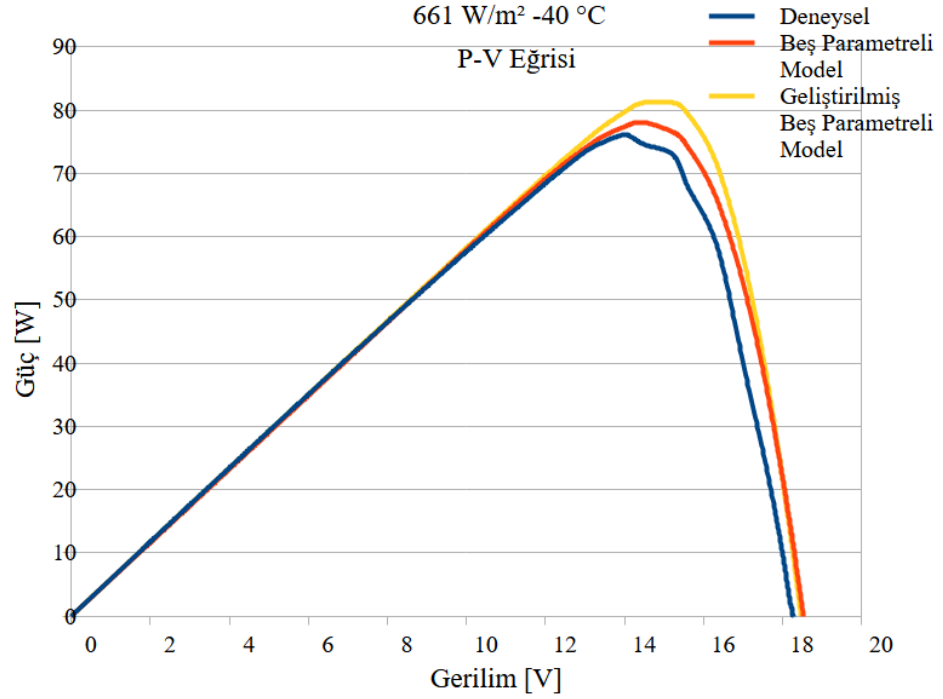
Şekil 3.12 763 W/m² ve 42 °C’ de gerilim ve güç değerleri.

Şekil 1.1’de gösterilen P-V eğrilerinden yola çıkarak, bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 2,71 olarak hesaplanırken, beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 2,17 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda; GBPM ve BPM’in hemen hemen aynı hata oranını verdiği gözlenmiştir.



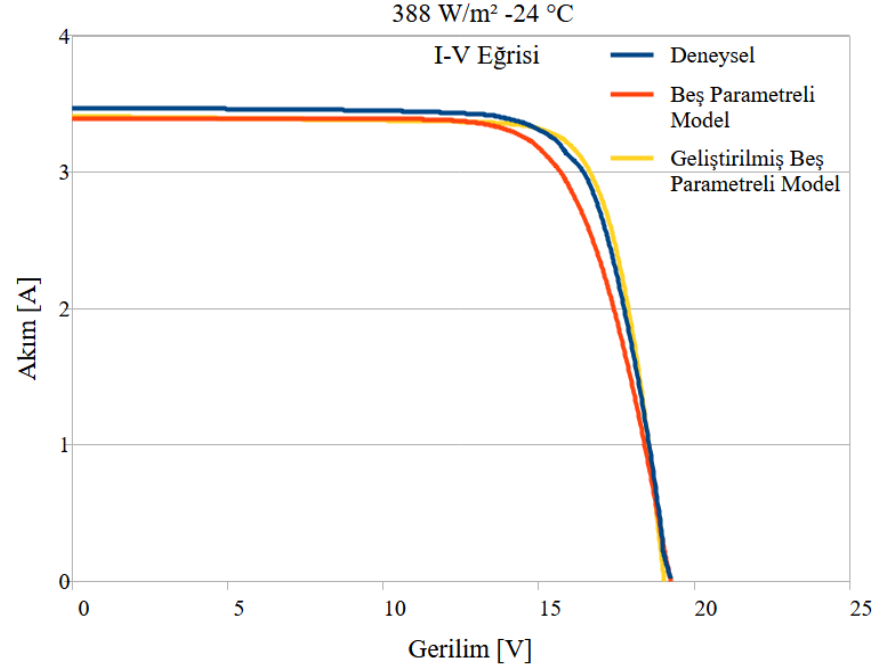
Şekil 3.13 641 W/m² ve 40 °C’ de gerilim ve akım değerleri.

Fotovoltaik panelin 763 W/m² ve 42 °C’ de ki deneysel verileri ile; geliştirilmiş beş parametrel model ve beş parametrel modelin çözümlemesinden elde edilen veriler Şekil 1.13’de ki gibi, I-V eğrisi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneysel ve modellerin çözümlemesinden elde edilen sonuçlar kullanılarak veriler arasındaki RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,385 olarak hesaplanırken, beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,322 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda; BPM’in, GBPM’e göre bir miktar daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Modellerin R-kare (R^2) yöntemi ile yapılan karşılaştırmalarında GBPM’in R^2 değeri %95, BPM’in ise %95 olarak hesaplanmıştır (bkz. Tablo 3.9). Şekil 1.14’de modellerden ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlara göre P-V panelin P-V eğrileri gösterilmiştir.



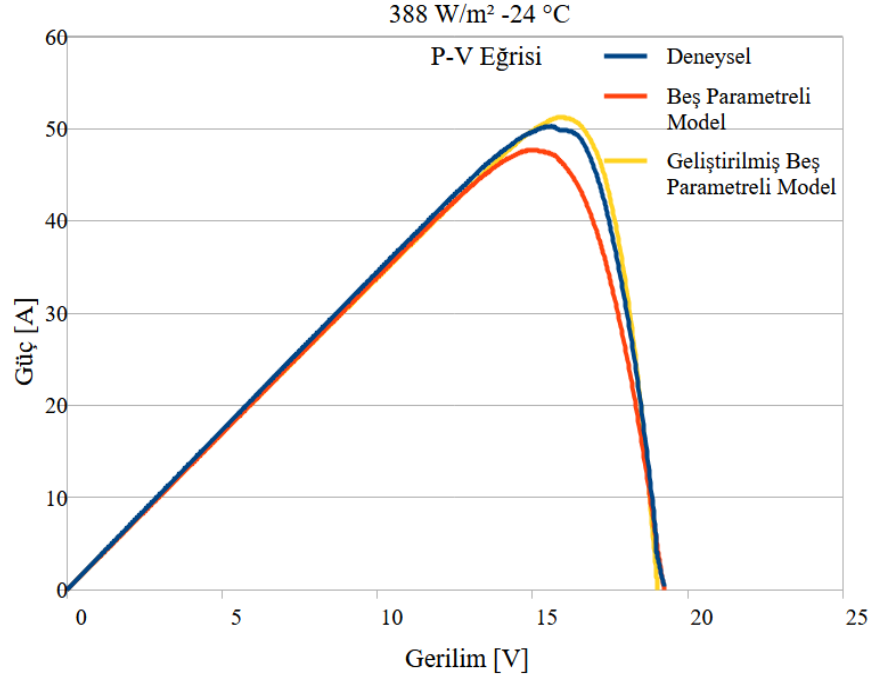
Şekil 3.14 641 W/m² ve 40 °C’ de gerilim ve güç değerleri.

Şekil 3.14’de gösterilen P-V eğrilerinden yola çıkarak, bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 6,56 olarak hesaplanırken, beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 5,67 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlar da GBPM ve BPM’in hemen hemen aynı hata oranını verdiği gözlenmiştir.



Şekil 3.15 388 W/m² ve 24 °C’ de gerilim ve akım değerleri.

Fotovoltaik panelin 1063 W/m² ve 34 °C’ de ki deneysel verileri ile; geliştirilmiş beş parametrel model ve beş parametrel modelin çözümlemesinden elde edilen veriler Şekil 3.15’de ki gibi, I-V eğrisi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneysel ve modellerin çözümlemesinden elde edilen sonuçlar kullanılarak veriler arasındaki RMSE değerleri hesaplanmıştır. Bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,081 olarak hesaplanırken, beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 0,131 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda; GBPM’nin, BPM’e göre en az hata oranıyla, en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir. Modellerin R-kare (R^2) yöntemi ile yapılan karşılaştırmalarında GBPM’in R^2 değeri %95, BPM’in ise %95 olarak hesaplanmıştır (bkz. Tablo 3.9). Şekil 3.16’de, modellerden ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlara göre P-V panelin P-V eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 3.16 388 W/m² ve 24 °C’ de gerilim ve güç değerleri.

Şekil 1.1’de gösterilen P-V eğrilerinden yola çıkarak, bu operasyon şartlarında, geliştirilmiş beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 1,17 olarak hesaplanırken, beş parametrel model ve deneysel veriler arasındaki RMSE değeri 2,12 olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda; GBPM’nin, BPM’e göre en az hata oranıyla en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir.

Bir fotovoltaik hücrenin elektriksel özelliklerinin ve performansının değerlendirilmesinde kritik öneme sahip bir diğer sayısal parametre, doldurma faktörüdür (FF). Bu parametre, fotovoltaik hücrenin performansını ölçmek için kullanılan önemli bir göstergedir (Pveducation, 2024). Doldurma faktörü (FF), hücrenin maksimum güç çıkışının (P_{max}), açık devre geriliminin (V_o) ve kısa devre akımının (I_s) çarpımına oranı olarak tanımlanır (bkz. Tablo 3.10). Matematiksel olarak, doldurma faktörü aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir;

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_s \cdot V_o} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3) kullanılarak, deneysel veriler (bkz. Tablo 3.5), geliştirilmiş beş parametrelili model verileri (bkz. Tablo 3.8) ve beş parametrelili model verileri (bkz. Tablo 3.6) kullanılarak her biri için fotovoltaik panelin farklı operasyon şartlarındaki doldurma faktörleri hesaplanmıştır.

Tablo 3.10. Farklı operasyon şartlarındaki doldurma faktörleri.

Operasyon şartları		Dolgu Faktörü (<i>FF</i>)		
Işınım (W/m ²)	Sıcaklık (°C)	Deneysel	BPM	GBPM
1063	34	0,665	0,727	0,722
877	43	0,541	0,579	0,729
763	42	0,697	0,766	0,740
641	40	0,706	0,725	0,748
388	24	0,730	0,729	0,788

4. TARTIŞMA

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi Geliştirilmiş Beş Parametrelî Model bilinmeyen parametreler için herhangi bir referans değeri kullanılmadan eşdeğer devre denkleminin farklı varyasyonlarını doğrudan çözen bir sayısal yaklaşım öne sürerken, Beş Parametrelî Model fotovoltaik panellerin parametrelerin tahmini ve hesaplanması için eşdeğer devre denklemlerini çözmek için referans değerler kullanılan analitik bir yaklaşım öne sürmektedir. Fotovoltaik bir panelin eşdeğer devre denkleminde oluşturulacak farklı operasyon şartlarındaki denklemler bilinmeyen beş parametrenin aynı anda çözülmesi için yeterli olmamaktadır. Örneğin; ışık akımının (I_{ph}) değeri kısa devre akımına (I_s) neredeyse eşit olup ondan daima fazladır. Lakin aralarındaki küçük farklılıklar bile eşdeğer devre denkleminin diğer tüm parametrelerini etkilemektedir. Buna rağmen eşdeğer devre denklemine sayısal çözümleme yapılacaksa ışık akımının (I_{ph}) yaklaşık değerinin, kısa devre akımı (I_s) kabul edilmesi doğru bir yaklaşım olacaktır. Fotovoltaik paneldeki seri iç direnç (R_s) ve paralel şönt direncinin (R_{sh}) etkisi özellikle I-V eğrisinin maksimum güç alındığı noktaları değiştirmektedir. Belli sınırlara kadar seri iç direncin (R_s) değeri, kısa devre akımı (I_s) ve açık devre gerilimini etkilememektedir, ama seri iç direncin çok yüksek olması durumlarında kısa devre akımı (I_s) azalmaktadır. Paralel şönt direnci de (R_{sh}) aynı ser iç direnç gibi maksimum gücün alındığı noktaları etkilerken, açık devre gerilimini (V_o) ve kısa devre akımını (I_s) değeri çok düşükse etkilememektedir. Buna ek olarak, literatürde paralel şönt direncinin (R_{sh}) değeri genellikle yüksek olduğunda çoğu zaman ihmal edilmektedir.

Ters doyma akımı (I_o) ve modifiye edilmiş diyot katsayısı (a) panelin sıcaklığıyla bağlantılı parametrelerdir. Değerleri, I-V eğrilerinde özellikle açık devre gerilimi ve kısa devre geriliminin noktalarını değiştirmektedir. Fotovoltaik panel üreticileri, panelin sıcaklıkla değişen davranışlarını tüketici ile paylaşmaktadır. Bunlar sıcaklık katsayılarıdır. Üretici tarafından verilen bu

değerlerin doğruluğu bu çalışmada çözülmeye çalışılan problemin çözüm yaklaşımı için çok önemlidir.

Bu çalışmada anlatılan ve geliştirilen yeni modele (Geliştirilmiş Beş Parametrelili Model) göre, eşdeğer devre denklemi temel alınarak bilinmeyen beş parametrenin çözümü için yeni denklemler türetilmiştir. MATLAB, ortamında bu denklemler “vpasolve” ve “solve” komutları ile çözülmeye çalışılmıştır. Yapılan çözümleme denemeleri sonucunda beş bilinmeyenli beş denklem sisteminin elimizdeki mevcut bilgiler ile çözülemediği tespit edilmiştir. Bunun temel nedeni bilinmeyen parametrelerin değerleri arasında çok büyük farklılıklar olmasıdır. Örneğin; ters doyma akımının (I_o) değeri çok küçük bir değer iken, şönt direnci (R_{sh}) çok büyük bir değer alabilmektedir. Bunun gibi bilinmeyen parametrelerin değerlerindeki uçurumlar eşdeğer devre denklemlerinin bir varyasyonunu sıfıra yakınsatırken, diğerini yakınsatmamaktadır. Örneğin; ters doyma akımının (I_o) değeri açık devre geriliminin değerini çok büyük ölçüde etkilemektedir. Çünkü, denklemde ki “ $\exp(V_o/a)$ ” ifadesinin değeri çok büyük bir sayı vermektedir ve bu sayının ters doyma akımı çarpanı ile düşürülmesi gerekmektedir. Bundan yola çıkarak ters doyma akımının ondalık değerinin çok doğru olması gerektiği tespit edilmiştir. Bunun aksine, kısa devre noktasındaki eşdeğer devre denklemi ifadesinde eksponansiyelin içi zaten çok küçük bir değer olduğu için, ters doyma akımı (I_o), referans değer kadar (1.10^{-10}) küçük ise denklem sonucu kısa devre akımını (I_s) doğru bir şekilde vermektedir. Dolayısıyla, kısa devre akımını (I_s), ters doyma akımı (I_o) çok etkilememektedir. MATLAB üzerinden yapılan hesaplamalar ve denemeler sonucunda, değeri çok küçük olan ters doyma akımı (I_o) bilindiğinde kalan tüm denklem sisteminin rahatlıkla çözüldüğü ve tüm parametrelerin tahmin edildiği tespit edilmiştir. Çünkü, ters doyma akımının (I_o) değeri çok küçük olduğu için, kalan tüm parametrelerin, sadece bir adet olası değeri tüm denklemleri sıfıra yakınsatmaktadır. Bu çalışmada ise, bahsedildiği gibi ters doyma akımının (I_o) doğru bulunmasına yönelik stratejiler izlenmiştir.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, seri iç direncin (R_s) farklı operasyon şartlarından (Işınım ve Sıcaklık) bağımsız olduğu kabul edilmiştir (Duffie ve Beckman, 2013). Lakin, çok az da olsa deneysel ve hesaplamalar karşılaştırıldığında değerinin küçük bir miktar değiştiği öngörülmektedir. Bu çalışma, fotovoltaiik hücre eş değer devre denkleminin, bilinmeyen parametrelere herhangi bir referans değer atamaksızın eş devre denkleminin farklı operasyon şartlarındaki varyasyonlarını doğrudan çözen bir sayısal yöntem ile çözümü amaçlayan yeni bir hesaplama yaklaşımı önermiştir. Tamamıyla sayısal çözümleme yapılan yöntemlerde her bir parametre için literatürde kabul edilen bazı değerler referans olarak atanmaktadır. Örneğin; ışık akımının (I_{pho}) referans değerinin, kısa devre akımı (I_s) olarak tanımlanması, değerler birbirlerine çok yakın olduğu için sayısal iterasyon yaparken doğru köke yakınsamasını kolaylaştırabilir. Bunun aksine, modifiye edilmiş diyot katsayısının referans (a_o) değeri bazı kaynaklarda 1 iken (Duffie ve Beckman, 2013) bazı kaynaklarda 1,5 kabul edilmiştir. Oysa ki, bu parametrenin referans değerinin, diğer parametrelerin çok doğru bir şekilde bulunması için gerçek değerine oldukça yakında olması gerekmektedir. Bu şart sağlanmaz ise sayısal çözümlemede parametreler doğru değere yakınsamamaktadır. Geliştirilmiş beş parametrelili fotovoltaiik hücre modeli, temelinde modifiye edilmiş diyot katsayısını (a) farklı sıcaklık şartlarında eşdeğer devre denkleminde gerekli düzenlemeleri yaparak doğru bir şekilde hesaplanmasını amaçlamaktadır. Modifiye edilmiş diyot katsayısı (a) kullanılarak ise ters doyma akımının (I_o) gerçek değerine en yakın değeri rahatlıkla hesaplanabilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aouad, I., ve Ahmed, M. (2018). Comparative study of two-diode and single-diode models for photovoltaic modules under real operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 175, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.049>
- Atay, B. K., ve Eminoğlu, U. (2019). A new approach for parameter estimation of the single-diode model for photovoltaic cells/modules. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 27(2), 982–994. <https://doi.org/10.3906/elk-1804-197>
- Celtek, S. A., ve Kul, S. (2023). Parameter extraction of PV solar cells using metaheuristic methods. *Bitlis Eren Üniversitesi, Journal of Science and Technology*, 13(2), 163–174. <https://doi.org/10.5078/bitlis.ern.2023.01302>
- Chin, V. J., Salam, Z., ve Ishaque, K. (2014). Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. *Applied Energy*, 132, 452–469. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.031>
- Ciulla, G., Lo Brano, V., Franzitta, V., ve Trapanese, M. (2013). Assessment of the operating temperature of crystalline PV modules based on real use conditions. *International Journal of Photoenergy*, 2013, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2013/296309>
- Cubas, J., Pindado, S., ve de Manuel, C. (2014). Explicit expressions for solar panel equivalent circuit parameters based on analytical formulation and the Lambert W-function. *Energies*, 7(5), 2925–2937. <https://doi.org/10.3390/en7052925>
- Duffie J. A. ve Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4. baskı.). Wiley.
- Electricistanbul, (2024). *Güneş panelleri nasıl çalışır?*. Electricistanbul. https://www.electricistanbul.com/2024/04/28/gunes-panelleri-nasil-calisir/#google_vignette adresinden 17 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.
- Et-torabi, K., Nassar-eddine, I., Obbadi, A., Errami, Y., Rmailly, R., Sahnoun, S., El Fajri, A. ve Agunaou, M. (2020). Tek ve çift diyot fotovoltaiik modellerinin parametre tahmini: Gauss-Seidel algoritması ve analitik yöntem ile karşılaştırmalı bir çalışma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110090. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110090>
- Franzitta, V., Orioli, A., ve Di Gangi, A. (2017). Assessment of the usability and accuracy of two-diode models for photovoltaic modules. *Energies*, 10(8), 1122. <https://doi.org/10.3390/en10081122>
- Hishikawa, Y., Imura, Y., ve Oshiro, T. (2000). Irradiance-dependence of the current–voltage characteristics of crystalline silicon solar cells. *Japanese Journal of Applied Physics*, 39(8), 4995–4999. <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.4995>
- Hua, Z., ve Qiu, J. (2019). A review of parameter extraction methods for photovoltaic module modeling. *Energy Reports*, 5, 1161–1172. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.010>
- Khotbehsara, A. Y. (2017). *A fast and accurate five parameters double-diode model of photovoltaic modules*. (Yüksek lisans tez çalışması, Elektrik, Biyomedikal ve Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İslam Azad Üniversitesi, Kazvin Şubesi, Kazvin, İran)
- Lo Brano, V., ve Ciulla, G. (2013). An efficient analytical approach for obtaining a five parameters model of photovoltaic modules using only reference data. *Applied Energy*, 102, 1114–1121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.004>
- Messenger, R. A. ve Ventre, J. (2004). *Photovoltaic systems engineering* (2. baskı.). CRC Press.

Muhammad, F. F., Sangawi, A. W. K., Hashim, S., Ghoshal, S. K., Abdullah, I. K., ve Hameed, S. S. (2018). Simple and efficient estimation of photovoltaic cells and modules parameters using approximation and correction technique. *PLOS ONE*, 13(6), e0199323. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199323>

Nasa, *Explorer 1 overview*. Nasa. <https://www.nasa.gov/history/explorer-1-overview/> adresinden 28 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.

Poweron, *Güneş paneli nasıl yapılır?*.Poweron. <https://poweron.com.tr/blog/gunes-paneli-nasil-yapilir> adresinden 20 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.

Pveducation, *Iv curve*. Pveducation. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve> adresinden 16 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.

Sahin, A. K. ve Ozdemir, S. (2020). Modeling of photovoltaic cells and modules under varying environmental conditions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109588. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109588>

Sandrolini, L., Artioli, M. ve Reggiani, U. (2009). Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis. *Applied Energy*, 86(11), 2289–2295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.007>

Shielden, *İnce film güneş panelleri nedir?*. Shieldenchannel. <https://tr.shieldenchannel.com/blogs/solar-panels/thin-film-solar-panels> adresinden 10 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.

Tr.wikipedia.org,.Alberteinstein.Tr.wikipedia.org. https://tr.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein adresinden 15 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.

Venkateswari, R. ve Rajasekar, N. (2021). Review on parameter estimation techniques of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110123>

Yeserenerji, *Güneşin yeni yüzü: monolitik perovskit hibrit tandem güneş hücreleri*. Yeserenerji. <https://yeserenerji.com/gunesin-yeni-yuzu-monolitik-perovskit-hibrit-tandem-gunes-hucreleri/> adresinden 19 Eylül 2024 tarihinde alınmıştır.

Zhao Y. ve Zhang J. (2019). Photovoltaic cell modeling for performance simulation under different environmental conditions. *Energy Reports*, 5, 1292–1301. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.04.005>