

GÜNEŞ PİLİ SERİ DİRENCİNİN
BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ YÖNTEMLER

Metin Kul

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Muhsin Zor

Şubat 1989

Metin Kul'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "GÜNEŞ PİLİ SERİ DİRENCİNİN BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ YÖNTEMLER" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

.22./ .02./ 1989.

Üye : Prof. Dr. Muhsin Zor

Üye : Prof. Dr. Atalay Barkana

Üye : Doç. M. Selami Kılıçkaya

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun **24 SUBAT** 1989
gün ve **204/11**..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Rüstem Kaya

ÖZET

Güneş pillerinde seri direnç, pilin verimini azaltan parazitik bir parametredir. Seri direnç genel olarak üst tabaka kontak, taban kontak, taban bulk, üst tabaka ve elektrotların dirençleri toplamından oluşmaktadır.

Bu çalışmada amacımız güneş pili seri direncinin belirlenmesi ile ilgili yöntemleri incelemektir. Pek çok yöntemler güneş pillerinin seri dirençlerini belirlemek için önerilmiştir. Bu çalışmada en çok kullanılan 6 yöntem üzerinde durulmuştur. Bu yöntemlerin bazıları farklı aydınlanma şiddetlerinde ve/veya karanlıkta akım-gerilim eğrilerinin incelenmesine dayanır. Bazı yöntemler de güneş pilleri için akım-gerilim denklemlerinin çözümüne dayanır.

İncelenen yöntemlerde; (i) uygun ışık şiddetlerinde diyod doyum akımı I_0 , ışık oluşum akımından oldukça küçük olduğundan, ihmal edilmiştir, (ii) diyod idealite faktörünün değeri tüm I-V eğrisi üzerinde sabit bir sayı olduğu kabul edilmiştir, (iii) sıfır terminal geriliminde kısa devre akımı ışık oluşum akımı olarak kullanılmıştır. Buna benzer yaklaşımlar nedeniyle incelenen yöntemlerde belirlenen seri direnç değerleri farklıdır. İki farklı aydınlanma altında I-V eğrilerinin değerlendirilmesine dayanan 1. yöntemde, seri direnç değerleri daha kolay ve hassas olarak belirlenebilmektedir. Çünkü bu yöntemle belirlenen seri direnç, diyod idealite faktöründen ve I_0 gibi diğer parametrelerden bağımsızdır.

SUMMARY

Series resistance in solar cells is a parasitic parameter which degrades the efficiency of an otherwise good cell. In a solar cell the series resistance is mainly the sum of top layer contact, base contact, base bulk, top layer and the resistances of the metallic electrodes.

Many techniques are available for estimating the series resistance of solar cells. In this study the six methods of determining the series resistance of the solar cells are investigated. Some of the methods are based on current-voltage curves at different light intensities and/or at dark. The other methods are based on numerical solution of the current-voltage equation based on an equivalent circuit model of the solar cell.

Some assumptions are being considered for the methods investigated. These are; (i) at a moderate light intensity levels, the diode saturation current is smaller than the light-generated current, the saturation current, therefore, can be neglected, (ii) the constant diode ideality factor is being used along the entire output characteristics, (iii) in the case of solar cell with zero terminal voltage, $V=0$, the short circuit current has been used as the light-generated current. These assumptions and different methods as expected yield varying series resistance values from one method to the other.

In a first method which is based on the evaluation of the I-V curves at different light intensities, the values of the series resistance can be obtained much more easily and more accurately when compared with the other methods. Because in this method the series resistance is independently evaluated of the diode ideality factor and the value of I_0 which is the diode saturation current.

TEŞEKKÜR

Tez konumu veren ve çalışmalarımın başladığı ilk günden son aşamasına kadar yardım ve desteğini gördüğüm Sayın Hocam Prof. Dr. Muhsin Zor'a en içten teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. GÜNEŞ PİLİ SERİ DİRENCİNİN BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ YÖNTEMLER	5
2.1. İki I-V Eğrisi Kullanılan Aydınlatılmış Eğri Yöntemi (1.Yöntem)	5
2.2. Uygun Bir Işık Şiddeti Altında Tek Bir I-V Eğ- risinden Yararlanılan Yöntem (2. Yöntem)	13
2.3. I-V Alanının Hesabı Yöntemi (3. Yöntem)	15
2.4. Farklı Işık Şiddetlerinde Her Kısa Devre Akı- mına Karşılık Açık Devre Gerilimi ve Karanlık Diyod Gerilimi Ölçüm Yöntemi (4. Yöntem)	19
2.5. Nispeten Yüksek Aydınlanma Şiddetlerinde Işık Şiddetine Karşı Kısa Devre Akımının Çiziminde Lineer Olmayan Durumdan Faydalanılan Yöntem (5. Yöntem)	24
2.6. Flash Testing Yöntemi (6. Yöntem)	27
3. SERİ DİRENCİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE BAĞLILIĞI	31
3.1. Seri Direncin Deneysel Hesaplanmasında Diyod İdealite Faktörünün Etkisi	31
3.2. Aydınlanma Şiddeti ve Sıcaklıkla Seri Direnç Değişimi	32
3.3. Metal Kontak Parmakların Seri Dirence Etkisi .	37
3.4. Seri Direncin Verime Etkisi	38

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. TARTIŞMA ve SONUÇ	41
KAYNAKLAR DİZİNİ	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1	p-n eklemli güneş pilinin şematik gösterimi .. 2
2	p-n eklemli bir güneş pilinin enerji band diyagramı 2
3	Tipik güneş pili 4
4	Güneş pili eşdeğer devresi 5
5	Güneş pili için Photovoltaic Output modeli kullanılarak elde edilen akım-gerilim karakteristiği 6
6	Farklı aydınlanma seviyelerinde A-M-12 güneş pilinin I-V karakteristikleri 8
7	Akım-gerilim eksenlerine paralel koordinat sisteminin taşınımı 10
8	Keyfi ΔI aralığında aynı noktanın iki eğri üzerinde bulunması 11
9	Çeşitli ΔI seçimleri için R_s değerlerinin hesaplanması 12
10	Silisyum güneş pili (CEL-192) için iki farklı ışık şiddetinde I-V karakteristiği 14
11	Silisyum güneş pili (CEL-192) için iki farklı ışık şiddetinde P-V karakteristiği 15
12	Üç farklı aydınlanma seviyelerinde deneysel I-V eğrileri 18
13	Güneş pili eşdeğer devresi 20
14	Akım ve aydınlanma şiddetiyle seri direnç değişimi 25
15	Aydınlatma şiddetinin bir fonksiyonu olarak I_{sc} kısa devre akımının ölçülen değerleri 26
16	I_{sc} 'nin bir fonksiyonu olarak Şekil 15'te elde edilen $\ln(I_L - I_{sc})$ 'nin grafiği 27
17	Fotoflash üniteli aydınlanmada güneş pili time response 28
18	Terminal akımı ve ışık şiddetiyle diyod idealite faktörünün değişimi 32
19	Diyod idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi 33
20	Seri direnç ölçümü için aydınlıkta ve karanlıkta I-V eğrileri 34
21	A,B,C,D single kristal silisyum pillerinde R_s 'in sıcaklıkla değişimi 35

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇizelgeSayfa

1 Düzeltilmiş seri direnç değerleri

19

SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
A	Alan
FF	Fill faktörü
I	Terminal akımı
I_L	Işık oluşum akımı
I_o	Diyod doyum akımı
I_s	Seri dirençten geçen akım
I_{sc}	Kısa devre akımı
J_o	Diyod doyum akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
L_1, L_2	Aydınlatma şiddeti seviyesi
n	Diyod idealite faktörü
P	Güç
P_s	Seri dirençte harcanan güç
R_k	Metal kafes kontağın bir parmağının tabaka direnci
R_L	Yük direnci
R_p	p- tabakasının direnci
R_s	Seri direnci
R_{sh}	Shunt direnci
R_1	Lineer metal kontak dirençleri
R_2	Yarıiletken üst tabaka direnci
R_3	Taban bulk direnci
s	Eğim
T	Mutlak sıcaklık
V	Terminal gerilimi
V_{oc}	Açık devre gerilimi
V_d	Karanlıkta terminal gerilimi
V_T	Termal potansiyel
z	Kafes parmakların uzunluğu
ΔI_L	Işık oluşum akımları farkı
β	Kafes parmakların genişliği
δ	İki parmak arası mesafe

1. GİRİŞ

Güneş pilleri güneş ışınlarını doğrudan elektriğe dönüştürürler. İlk güneş pili bakiroksit (CuO_2) ve selenyumdan (Se) yapılmıştır. Ancak ilk esaslı güç elde edilen fotovolttaik güneş pili 1954 yılında Bell Telephone laboratuvarında (USA), Pearson, Fuller ve Chapin tarafından gerçekleştirilen p-n homoeklemlili silisyum (Si) güneş pilleridir. Bu pilin verimi % 15 civarında bulunmuştur. Fotovolttaik güneş pili yapımında en çok kullanılan materyaller silisyum, galyumarsenik, kadmiyumsülfür ve kadmiyumtellürdür.

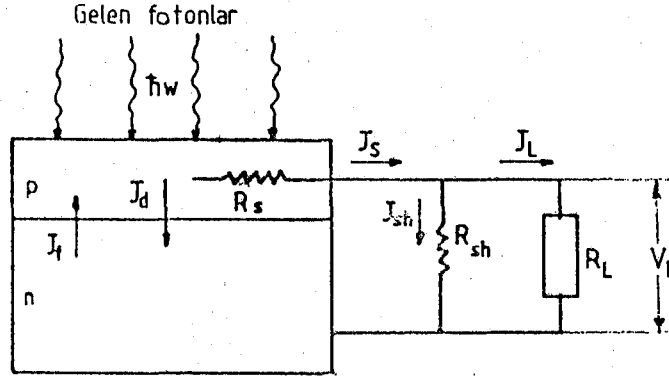
Güneş pilleri ilk zamanlar yalnız uzay çalışmalarında kullanılmıştır. Ancak 1973 petrol krizinden sonra yeryüzünde de enerji üretimi için kullanılması düşünülmüştür. Bu amaç için güneş pillerinin hem ekonomik hem de yüksek verimle çalışması gerekmektedir. Güneş pillerinin çalışma esası fotovolttaik olaya dayanır.

Işın etkisiyle herhangi bir yarıiletkenlede elektron-hol çiftinin oluşması olayına fotovolttaik olay adı verilir. Fotovolttaik olay sonucu meydana gelen akıma fotoakım denir.

Fotovolttaik olay iki aşamada meydana gelir. Bunlar birer taşıyıcı yük çifti olan elektron-hol çiftinin oluşturulması ve bu yük çiftlerinin birbirinden ayrılması olayıdır. Bir cihazın güneş pili olarak kullanılabilmesi için en az iki özelliğe sahip olması gerekir. (i) Cihazın üzerine gelen ışınların cihaz tarafından absorplanması, (ii) Absorplanan ışınların bir kısmı tarafından oluşturulan, taşıyıcı yük çiftlerinin birbirinden ayrılmasını sağlayacak temel bir elektrik alanının olmasıdır.

p-n eklemlili fotovolttaik güneş pilleriyle elektrik elde etmek için pil üzerine gelen ışınlar eklem bölgesine veya bu bölgenin yakınına düşürülmelidir. Çünkü eklem bölgesinden uzak bölgelerde ışınların etkisiyle oluşan yük

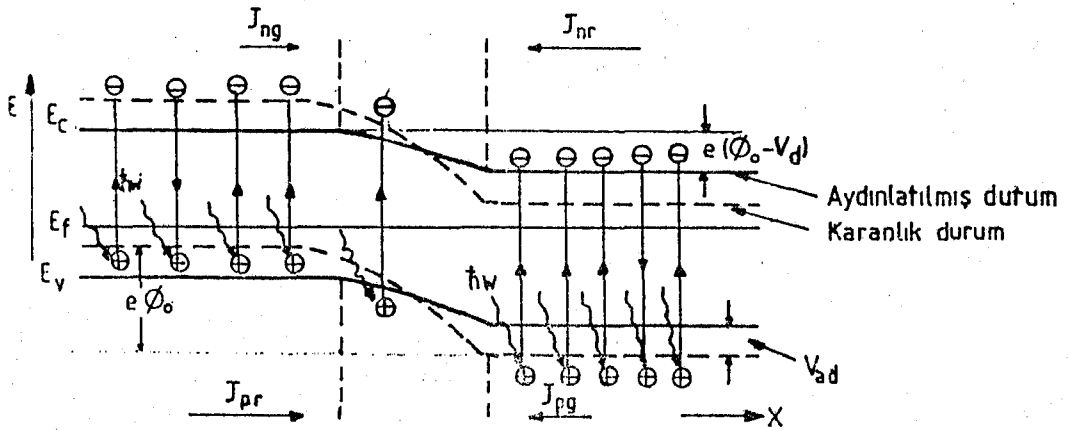
çiftlerinin tekrar birleşmelerinden dolayı meydana getirecekleri akımların fotoakıma herhangi bir katkısı olmaz, Şekil 1. Burada J_f fotoakım yoğunluğu, J_d diyod doyum akım yoğunluğu, J_s seri dirençten geçen akım yoğunluğu, J_{sh}



Şekil 1. p-n eklemli güneş pilinin şematik gösterimi (Köse, 1986).

shunt dirençten geçen akım yoğunluğudur.

Fotovoltaik güneş pilleri, absorplanmış fotonların meydana getirmiş olduğu akımı geçirecek yönde, bir diyod üzerine paralel bağlanmış sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Fotovoltaik güneş pilleri daima ileri yönde beslenmiş bir p-n eklem diyodu gibi çalışır, Şekil 2. Burada



Şekil 2. p-n eklemli bir güneş pilinin enerji band diyagramı, (Köse, 1986).

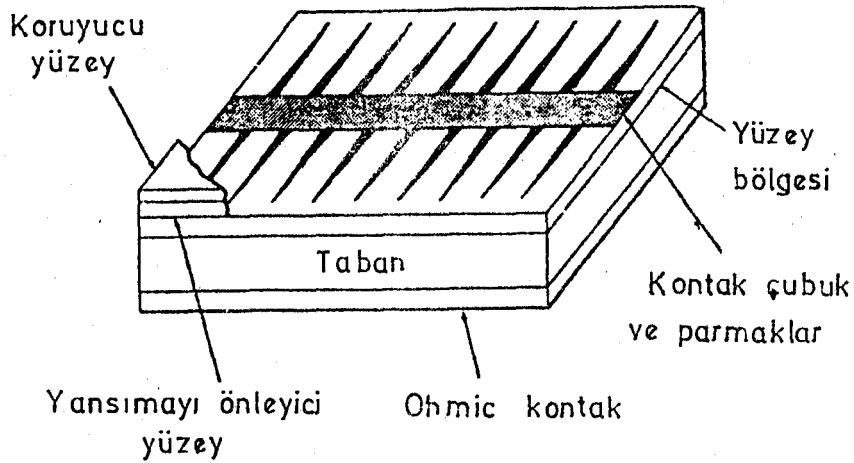
J_{ng} , J_{pg} elektron ve hollerin oluşum akım yoğunlukları, J_{nr} , J_{pr} elektron ve hollerin birleşim akım yoğunlukları, ξ_f fermi enerji seviyesi, ξ_v valans bandı üst enerji seviyesi, ξ_c iletim bandının alt enerji seviyesi, ϕ_0 p-n eklemının kontak potansiyeli, V_d diyod üzerindeki gerilim, V_{ad} açık devre gerilimidir.

p-n eklemli fotovolttaik bir güneş pilinde fotonların absorplanmasıyla eklemının her iki tarafında taşıyıcı yük (elektron-hol) fazlalıkları meydana gelir. Eklemının her iki yanındaki çoğunluk yük taşıyıcıları diffüzyon yoluyla azınlık taşıyıcı yükleri ise eklem bölgesinde var olan elektrik alanının (\mathcal{E}) sürüklemesiyle eklem bölgesini geçerek fotoakım yoğunluğunu meydana getirirler. Fotoakım yoğunluğu (J_f) p-n eklemını ileri yönde besler. Bu nedenle J_f p-tipi bölgeyi pozitif, n-tipi bölgeyi negatif olarak yükler ve bu anda p-n eklemının potansiyel engel yüksekliği ϕ_0 azalacağından çoğunluk taşıyıcı yükleri azınlıkta oldukları bölgelere doğru diffüz ederler. Bu çoğunluk taşıyıcı yüklerin oluşturduğu birleşim akım yoğunluğu J_r p-tipi bölgeyi negatif, n-tipi bölgeyi pozitif olarak yükler. Bu yüklenmeden dolayı J_f fotoakım yoğunluğu p-n eklemını ters yönde besler ve ϕ_0 potansiyel engel yüksekliği artacağından çoğunluk taşıyıcı yüklerinin eklem bölgesini geçişleri engellenmiş olur. Bu anda tekrar bir foton absorplanır ve ϕ_0 'ın yüksekliği tekrar azalır. Böylece ϕ_0 'ın bir azalıp bir artması güneş pili ışınlarının etkisinde kaldığı sürece devam eder.

Fotovolttaik güneş pillerinin güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüşüm verimi diğer enerji dönüşüm sistemlerine göre daha düşüktür. Verimin düşük olması çeşitli etkenlerle birlikte seri dirençle de ilgilidir. Seri direnç yüksek verimli güneş pillerinde önemli bir parazitik kayıptır.

Güneş pilinin seri direnci farklı tabakalardan geçen akımdan kaynaklanan bir dağılım olduğu kabul edilmek-

tedir. Seri direnç, üst tabaka ve taban kontak direnci, taban bulk direnci, üst tabaka direnci ve elektrotların dirençleri toplamıdır. Kontak dirençler, metal kontak ve yarıiletken arasındaki iç yüzeyde metal-yarıiletken engelleriyle oluşan dirençtir. Üst tabaka direnci, p-tabakasının kalınlığı, elektron mobilitesi ve elektron ömrü ile ilgili dirençtir. Taban bulk direnci, diffüzyonlu bölgede hareket eden taşıyıcılardan kaynaklanan dirençtir. Tipik bir güneş pili Şekil 3'te görülmektedir. Ayrıca farklı kaçak akımlardan kaynaklanan direnç de shunt direnci olarak adlandırılır.



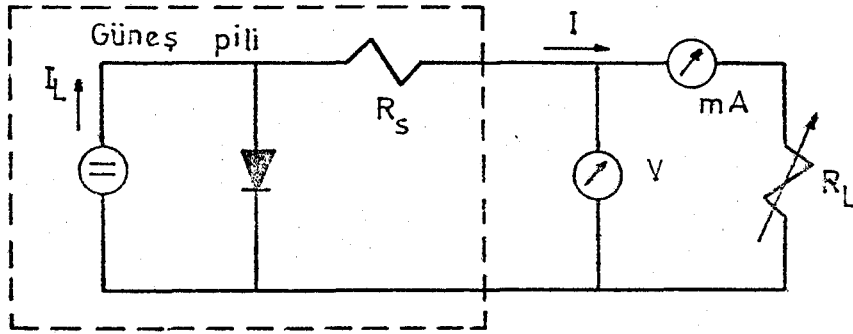
Şekil 3. Tipik güneş pili, (Pulfrey, 1978).

Güneş pilinin seri direnci hesaplanırken teorik hesaplamalarla birlikte akım-gerilim karakteristiğinden de yararlanılabilir. Akım-gerilim karakteristiği "Photovoltaic Output" modeli yardımıyla elde edilebilir. Photovoltaic Output modeli, sabit bir ışık şiddeti altında değişken bir direncin açık devre ve kısa devre durumları arasında değiştirilerek pilin çıkış uçları arasındaki gerilime karşı dirençten geçen akımın ölçülmesiyle elde edilir.

2. GÜNEŞ PİLİ SERİ DİRENCİNİN BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ YÖNTEMLER

2.1. İki I-V Eğrisi Kullanılan Aydınlatılmış Eğri Yöntemi (1. Yöntem)

Birçok yöntemlerde güneş pili seri direncini tahmin etmek mümkündür. Güneş pilleri için akım-gerilim karakteristikleri Photovoltaic Output modeli yardımıyla elde edilebilir (Wolf and Rauschenbach, 1963). Bu modelin güneş pili eşdeğer devresi ve akım-gerilim karakteristiği Şekil 4. ve Şekil 5.'te görülmektedir.

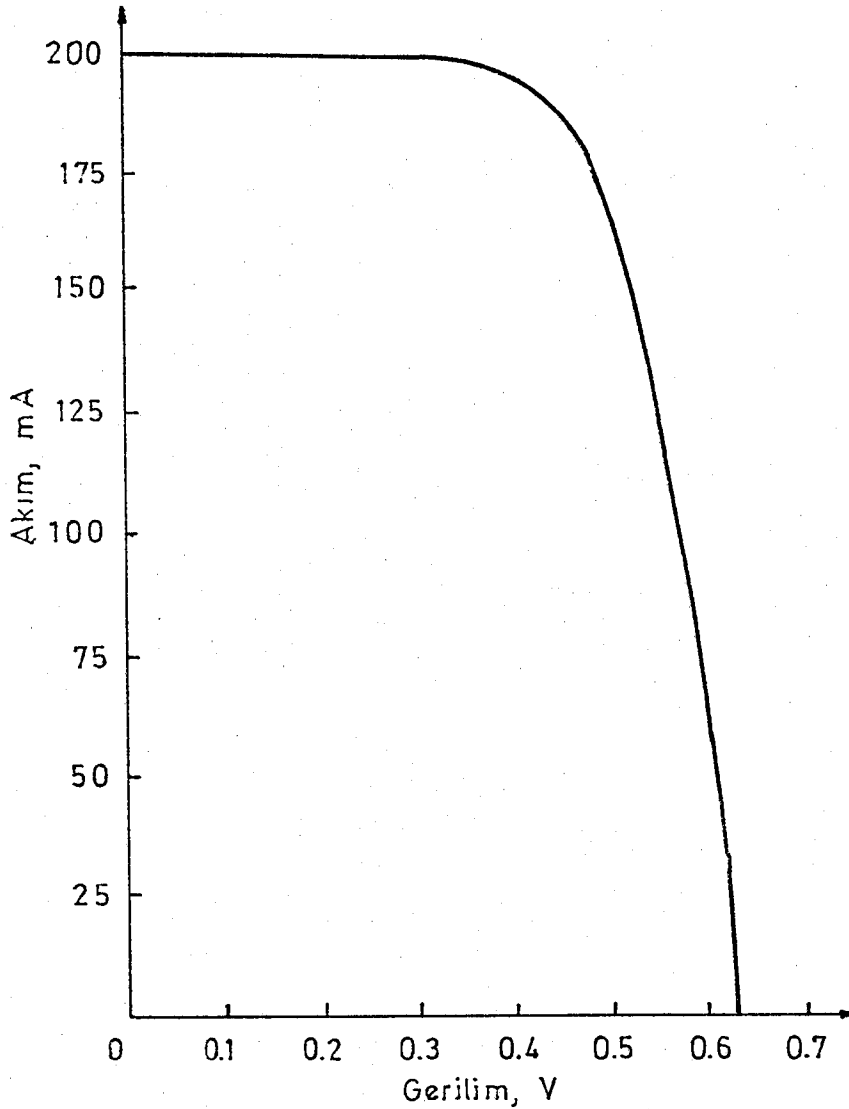


Şekil 4. Güneş pili eşdeğer devresi (Wolf and Rauschenbach, 1963).

Aşağıdaki ifade Photovoltaic Output modeli kullanılarak elde edilen akım-gerilim karakteristiğini tanımlamak için kullanılır.

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left[\frac{q}{nkT} (V + IR_S) \right] - 1 \right) \quad (1)$$

Burada I_L ışık oluşum akımı olarak adlandırılır. Eğer radyasyonun spektral dağılımı değişmiyorsa, I_L yüzeye düşen ışık şiddetiyle orantılıdır (Sayıgh, 1977). Ayrıca I terminal akımı, V gerilim, R_S seri direnç, I_0 diyod doyum akımı, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, n diyod idealite faktörü, 1-5 arasında boyutsuz sabittir. Bununla beraber çoğu güneş pillerinde 2,5-3 arasındadır.



Şekil 5. Güneş pili için Photovoltaic Output modeli kullanılarak elde edilen akım-gerilim karakteristiği (Wolf and Rauschenbach, 1963).

Sıfır seri dirençli ($R_s=0$) güneş pili durumunda: shunt ve seri direnç ihmal edilerek güneş pilinin akım-gerilim karakteristiğini tanımlayan Eş.(1)'i

$$I = I_L - I_0 (e^{BV} - 1) \quad (2)$$

olarak yazabiliriz. Burada $B = q/nkT$ ile verilir.

L_1 ışık seviyesinde Eş.(2)

$$I_1 = I_{L1} - I_0 (e^{BV_1} - 1) \quad (3)$$

L_2 ışık seviyesinde Eş.(2)

$$I_2 = I_{L2} - I_0 (e^{BV_2} - 1) \quad (4)$$

olarak yazılır, Şekil 6. V bağımsız değişken olması nedeniyle $V_2 = V_1$ seçebiliriz. 0 halde

$$I_{L2} = I_{L1} + \Delta I_L \quad (5)$$

yazabiliriz. Burada ΔI_L 1. ve 2. ışık seviyeleri farkıyla orantılıdır. $V_2 = V_1$ ve Eş.(5)'i Eş.(3) ve Eş.(4)'te yerine koyup taraf tarafa çıkartırsak

$$I_2 = I_1 + \Delta I_L \quad (6)$$

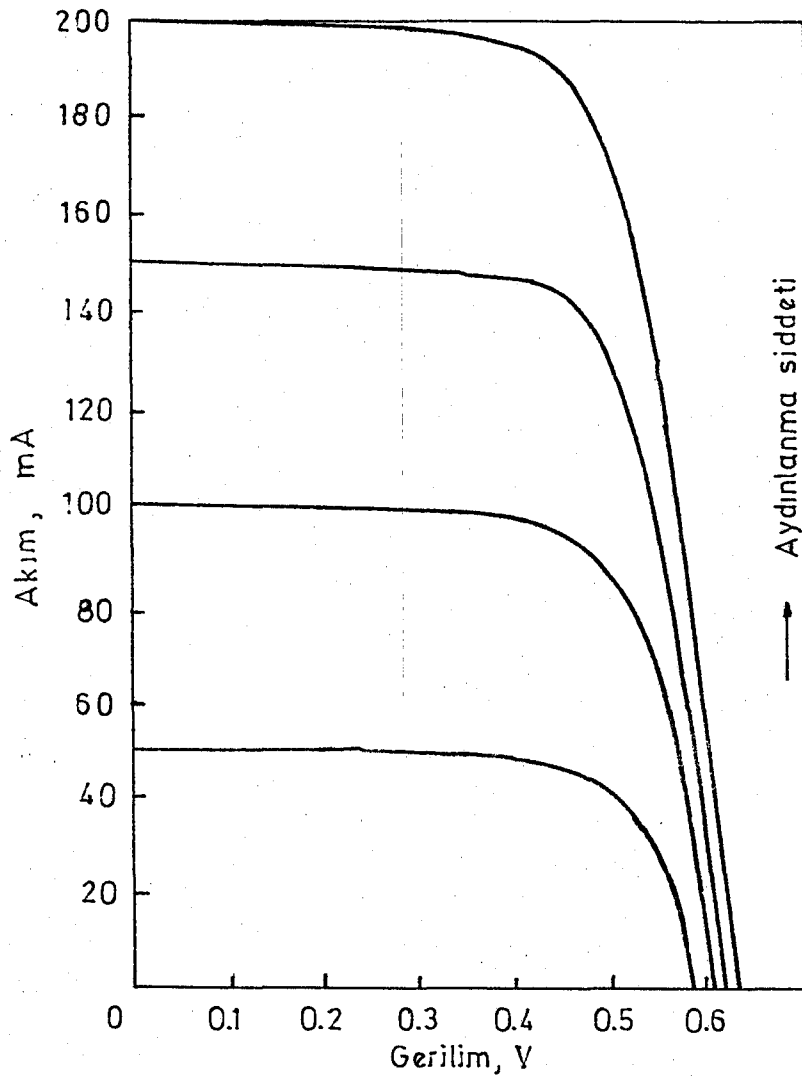
elde ederiz. Eş.(6) akım eksenini üzerinde ΔI_L miktarı kadar, akım eksenine paralel, koordinat sisteminin taşınımını tanımlar.

Sıfır seri dirençli güneş pili durumunda eksponensiyel kısım yalnız bağımsız değişken olan terminal gerilimini kapsar. Herhangi bir sabit ışık seviyesi için Eş.(1) in sağ tarafında yalnız eksponensiyel terim değişkendir. 0 zaman ışık şiddetinin herhangi bir değişiminde, I_L ışık oluşum akımı bağıntıya dahil olur. Sabit V terminal geriliminde, ışık şiddetleri sonuçlarında bir değişim, I terminal akımının değişiminde ΔI_L ışık oluşum akımlarının farkına eşittir. Bu da eksponensiyel terim yardımıyla hesaplanılan eğrinin şeklinden ışık şiddeti ile ilgili olarak sabit bir nicelik olduğu anlamına gelir.

Buraya kadar özetlenen küçük seri direnç değerli veya seri direnç değerleri ihmal edilebilir olan yeterince düşük ışık seviyelerindeki güneş pilleri için geçerlidir. Bu durum IR_s çarpımı V terminal gerilimine kıyasla ihmal edildiğinde açıklandı. İhmal edilmediği durumda: yüksek ışık seviyeleri için I - V karakteristiği seri direnç etkisini içermek zorundadır(I akım değerinin artışına bağlı olarak). Burada

$$V' = V + IR_s \quad (7)$$

p - n eklemi üzerindeki gerilimdir ve seri dirençte gerilim



Şekil 6. Farklı aydınlanma seviyelerinde A-M-12 güneş pilinin I-V karakteristikleri, (Wolf and Rauschenbach, 1963).

düşmesiyle V terminal geriliminden büyüktür. Şekil 4'teki güneş pili eşdeğer devresi için I-V karakteristiği

$$I = I_L - I_0 (e^{B(V+IR_s)} - 1) \quad (8)$$

$$I = I_L - I_0 (e^{B V'} - 1) \quad (8.a)$$

olarak ifade edilebilir. 1. ve 2. ışık şiddeti seviyeleri için

$$I_1 = I_{L1} - I_0 (e^{B V_1'} - 1) \quad (9.a)$$

$$I_2 = I_{L2} - I_0 (e^{BV_2'} - 1) \quad (9.b)$$

$$I_2 = I_{L1} + \Delta I_L - I_0 (e^{BV_2'} - 1) \quad (10)$$

eşitliklerini yazabiliriz. Burada

$$V_2' = V_1' \quad (11)$$

seçersek daha önceki gibi aynı dönüşümleri elde ederiz.

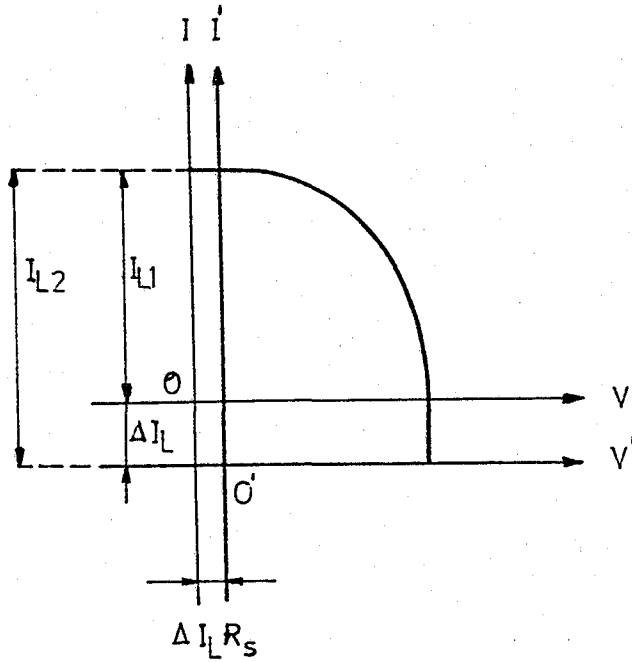
$$I_2 = I_1 + \Delta I_L \quad (6)$$

Bununla birlikte, Eş.(7) I_1 ve I_2 akımları için V_1 ve V_2 gibi farklı terminal gerilimlerine dayanır. Eş.(11), (7) ve (6)'dan

$$V_1 + I_1 R_s = V_2 + I_1 R_s + \Delta I_L R_s \quad (11.a)$$

herhangi bir V_1 seçimi için V_1 ve V_2 arasında sabit bir bağıntı tanımlanır. Bu sabit bağıntı seri direnç ve ışık şiddeti seviyelerindeki değişimle orantılıdır. Böylece Eş.(11.a) $V_2 = V_1 - \Delta I_L R_s$ miktarı kadar gerilim eksenine paralel, koordinat sisteminin ikinci bir taşınımını tanımlar. İkinci bir taşınım, R_s seri direnç ve ΔI_L ışık oluşum akımlarındaki farkın çarpımına eşit bir miktarla terminal geriliminin azalmasından ibarettir. Şekil 7'de bu taşınımlar görülmektedir.

Buraya kadar tanımlanan koordinat sisteminin taşınımını kullanarak herhangi bir güneş pilinin seri direncini hesaplayabiliriz. Bu amaç için photovoltaic output karakteristiği, büyüklüğü bilinmek zorunda olmayan, iki farklı ışık şiddetinde ölçülmelidir. Herbiri yazıldığı sıraya göre, iki karakteristik x ve y yönünde $\Delta I_L R_s$ ve ΔI_L miktarları kadar herbirine karşı transferidir. İki karakteristik üzerinde karşı gelen iki nokta birbirleriyle ilgili olarak bir yerdeğiştirme gösterir ki koordinat sistemlerinin akım-gerilim taşınımları benzerdir. Ordinata paralel yerdeğiştir-



Şekil 7. Akım-gerilim eksenlerine paralel koordinat sisteminin taşınımı (Wolf, 1963).

tirme ΔI_L değerini verir. Absise paralel yerdeğiştirme $\Delta I_L R_s$ değerini verir. Böylece R_s seri direncini kolaylıkla elde ederiz.

Bu kural için pratik bir yaklaşım, birinci karakteristikten hesaplanan, I_{sc} kısa devre akımından keyfi ΔI aralığı seçmektir. Aynı ΔI değeri ikinci bir eğri üzerinde ikinci bir noktaya karşı geleni bulmak için kullanılır. Şekil 8'de kuralın tanımlanması görülmektedir.

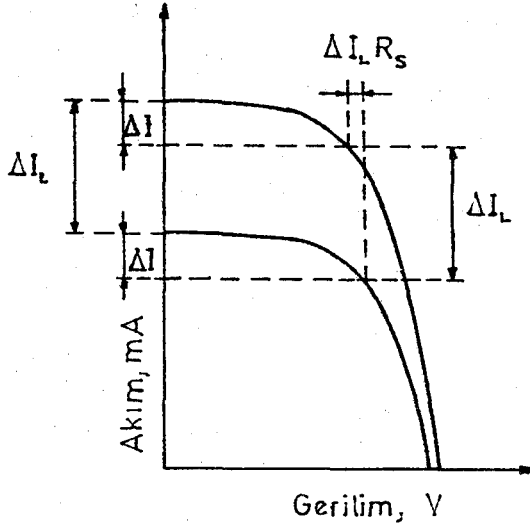
Şekil 9'dan yararlanarak çeşitli ΔI seçimleri için R_s değerlerini hesaplayalım.

$\Delta I_1 = 10$ mA için,

$\Delta V_1 = 0,035$ V

$\Delta I_L = 50$ mA

$$R_s = \frac{\Delta V_1}{\Delta I_L}$$



Şekil 8. Keyfi ΔI aralığında aynı noktanın iki eğri üzerinde bulunması (Wolf and Rauschenbach, 1963).

$$R_s = \frac{0,035}{50 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_s = 0,70 \text{ Ohm}$$

$\Delta I_2 = 30 \text{ mA}$ için,

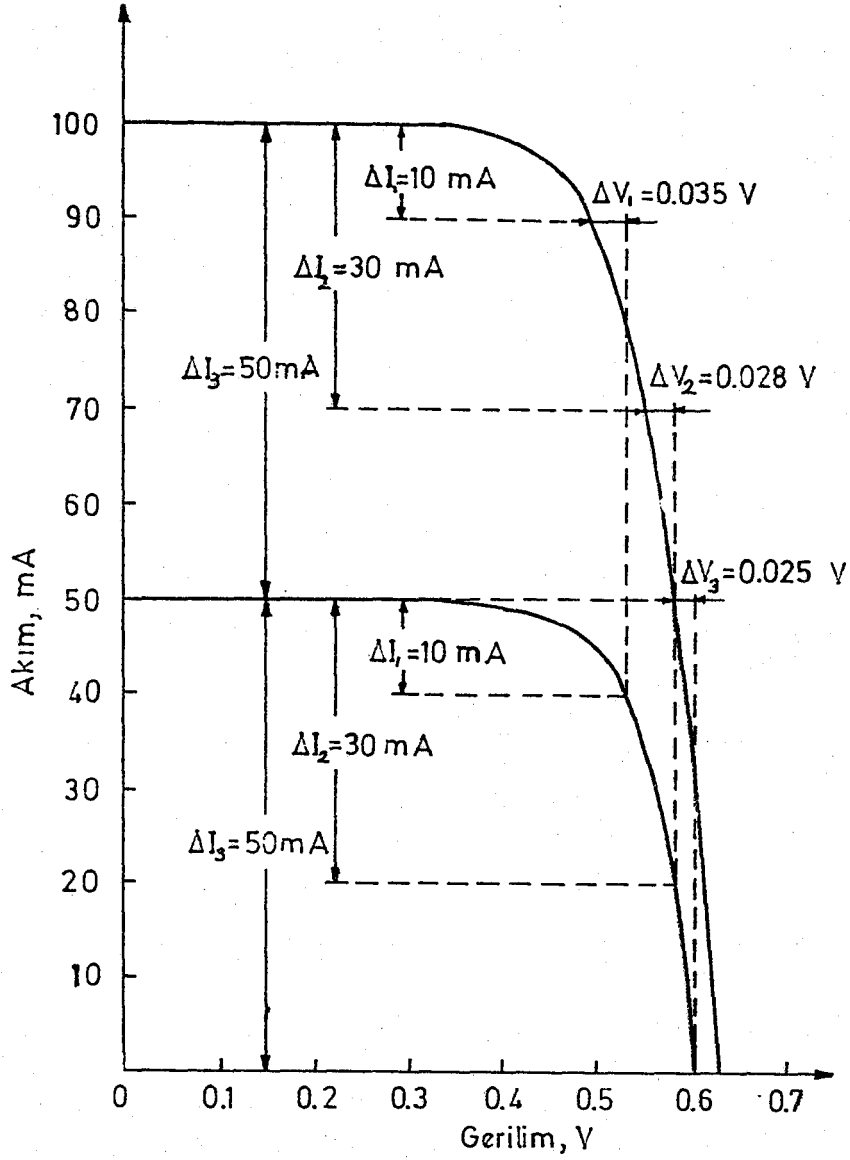
$\Delta V_2 = 0,028 \text{ V}$

$\Delta I_L = 50 \text{ mA}$

$$R_s = \frac{\Delta V_2}{I_L}$$

$$R_s = \frac{0,028}{50 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_s = 0,56 \text{ Ohm}$$



Şekil 9. Çeşitli ΔI seçimleri için R_S değerlerinin hesaplanması (Wolf and Rauschenbach, 1963).

$\Delta I_L = 50 \text{ mA}$ için

$\Delta V_3 = 0,025 \text{ V}$

$\Delta I_L = 50 \text{ mA}$

$$R_S = \frac{\Delta V_3}{\Delta I_L}$$

$$R_S = \frac{0,025}{50 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_S = 0,50 \text{ Ohm}$$

olarak farklı ΔI değerleri için seri direnç hesaplanmıştır.

2.2. Uygun Bir Işık Şiddeti Altında Tek Bir I-V Eğrisinden Yararlanılan Yöntem (2. Yöntem)

Bu yöntemde makul bir ışık şiddeti altında güneş pili için tek bir I-V karakteristiğinden yararlanılmıştır. Güneş pili eşdeğer devresi 1. Yöntemde verilmiştir. (Bkz. Şekil 4). Bu güneş pili için aşağıdaki eşitliği yazabiliriz.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q (V + IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$P = (I_L + I_0) V - I_0 V \left[\exp \left(\frac{q (V + IR_S)}{nkT} \right) \right] \quad (12)$$

Burada P güç olarak adlandırılır.

Maksimum güç elde edebilmek için $dP/dV=0$ şartı

$$\left(\frac{dI}{dV} \right)_{\max_p} = - \left(\frac{I}{V} \right)_{\max_p} \quad (13)$$

ifadesine eşdeğerdir (Avaritsiotis, 1985). Maksimum güç çıkışı için Eş.(1) ve (12)'yi kullanarak

$$\frac{I_{\max_p}}{V_{\max_p}} = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V+IR_S)}{nkT} \right) \right] \frac{q}{nkT} \left(1 - \frac{IR_S}{V} \right)$$

ifadesini elde ederiz. Burada $I_0 \ll I_L$ olduğunu kabul ettiğimiz zaman (uygun aydınlanma şiddeti durumunda) yukarıdaki ifadeyi

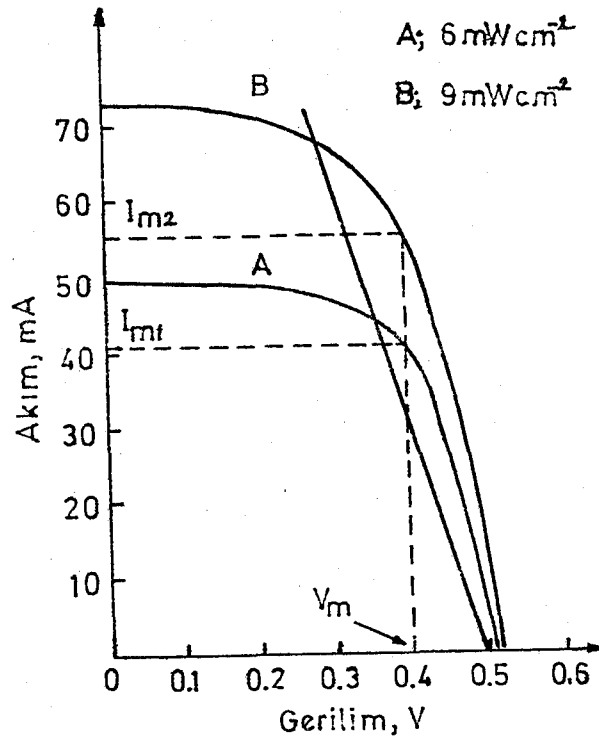
$$\frac{I_{\max_p}}{V_{\max_p}} = (I_L - I_{\max_p}) \frac{q}{nkT} \left(1 - \frac{I_{\max_p}}{V_{\max_p}} R_S \right) \quad (14)$$

olarak yeniden yazarız. Burada \max_p indisi güneş pili I-V karakteristikleri üzerinde maksimum güç noktası için

kullanılmıştır. Eş.(14)'ü kullanarak güneş pilinin seri direncini veren ifadeyi

$$R_s = \frac{V_{max_p}}{I_{max_p}} - \frac{nkT}{q(I_L - I_{max_p})} \quad (15)$$

olarak yazarız. Bu eşitlikte I_{max_p} Şekil 10 ve 11'de güneş pili I-V karakteristikleri üzerinde $V=V_{max_p}$ 'ye karşı gelen akım değerlerinden elde edilmiştir.



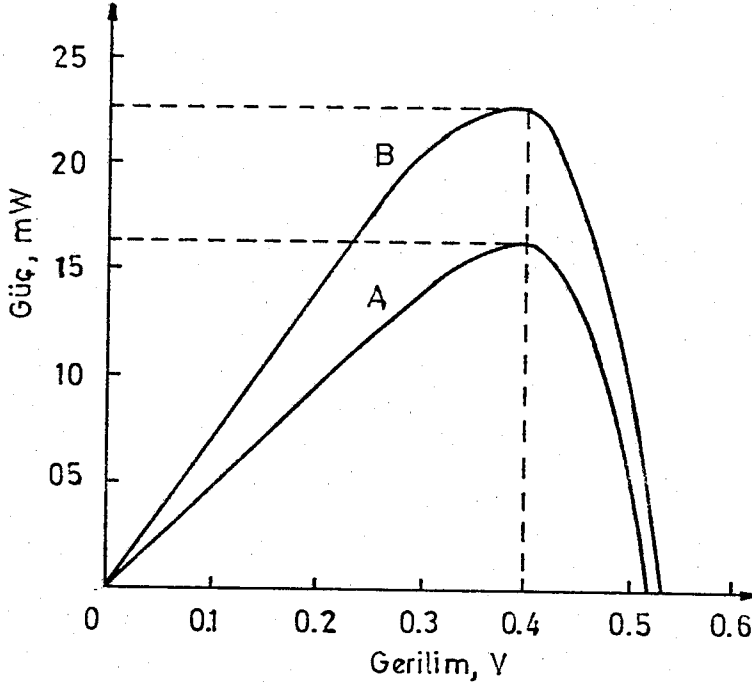
Şekil 10. Silisyum güneş pili (CEL-192) için iki farklı ışık şiddetinde I-V karakteristiği (Singh and Singh, 1983).

Çoğu güneş pilleri için diyod idealite faktörü n , 2,5-3 arasında bir değere sahiptir. 300°K'de ($kT \approx 0,025eV$) uygun ışık şiddetinde silisyum güneş pili için $n=2,5$ alabiliriz. Şekil 10'dan görüldüğü gibi 6 mW/cm^2 değeri için $V_{max_p} = 0,4 \text{ V}$, $I_{max_p} = 40,5 \text{ mA}$, $I_L = 50,0 \text{ mA}$ ($V=0$ durumunda $I_{sc} \approx I_L$ olarak alınabilir) değerlerini Eş.(15)'te yeri-

ne koyarsak

$$R_s = \frac{0,4}{40,5 \cdot 10^{-3}} - \frac{2,5 \cdot 0,025}{(50 - 40,5) \cdot 10^{-3}}$$

buradan $R_s = 3,3$ Ohm olarak güneş pili seri direnci hesaplanmıştır.



Şekil 11. Silisyum güneş pili (CEL-192) için iki farklı ışık şiddetinde P-V karakteristiği (Singh and Singh, 1983).

2.3. I-V Alanının Hesabı Yöntemi (3. Yöntem)

Bu yöntem güneş pili I-V aydınlanma ölçümleri altında seri direnç etkisini değerlendirmek için önerilmiştir. Burada başka yöntemlerin kullandığı eğimlerden ziyade alanlar hesabının avantajı kullanılmıştır.

Güneş pili eşdeğer devresi için (Bkz. Şekil 4)

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{q(V + IR_s)}{nkT} - 1 \right) \quad (1)$$

ifadesini yazabiliriz veya

$$V = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L + I_0 - I}{I_0} \right) - IR_S \quad (16)$$

şeklinde yazarız.

Eş.(16) ile tanımlanan eğri altındaki toplam alanı

$$A = \int_0^{I_{sc}} V(I) dI$$

olarak ifade edebiliriz. Böylece A

$$A = \frac{nkT}{q} [(I_L + I_0) \ln \frac{I_L + I_0}{I_L + I_0 - I_{sc}} + I_{sc} \ln \frac{I_L + I_0 - I_{sc}}{I_0} - I_{sc}] - \frac{I_{sc}^2 R_S}{2} \quad (17)$$

olarak elde edilir.

Çoğu güneş pillerinde uygun aydınlatma şiddetinde $I_0 \ll I_L$ olarak kabul edilmiştir. Ayrıca $I_{sc}R_S$ ani ohmic gerilim düşüşü nkT/q 'dan birkaç kat küçüktür. Bu nedenle aşağıdaki yaklaşımı kabul edebiliriz.

$$I_{sc} \approx I_L + I_0 \quad (18)$$

ve

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (19)$$

Burada V_{oc} açık devre gerilimidir.

Eş.(18) ve (19)'u Eş.(17)'de yerine koyarsak, R_s 'yi

$$R_s = 2 \left[\frac{V_{oc}}{I_{sc}} - \frac{A}{I_{sc}^2} - \frac{nkT}{q} \frac{1}{I_{sc}} \right] \quad (20)$$

olarak yazabiliriz.

Deneysel veriden A alanı (I_{sc} ve V_{oc} ölçümünü içeren) sabit bir değerdir ve Eş.(20)'yi kullanarak seri direnci hesaplayabiliriz. n değerinde belirsizlik, iki gerçeğe bağlı olarak, yeterince büyük değerli kısa devre akımlarında anlamlı etki vermez. Birincisi, pekçok güneş pillerinde direnç etkilerini göstermek için gerekli aydınlanma seviyelerinde diffüzyon akımı hemen hemen bütün I-V eğrisi boyunca dominanttır ve bu nedenle n, 1'e (bir) oldukça yakındır. İkincisi, Eş.(20)'nin üçüncü teriminin katkısı kısa devre akımının artmasıyla daha az olur.

Laboratuvarda üretilen 0,4 Ohm.cm öz dirençli, 2 inç çapında n^+p-p^+ tipi güneş pilinin akım-gerilim değerleri üç farklı aydınlanma seviyesi altında ölçülmüştür. Ölçümler boyunca pil sıcaklığı 24 °C'de su yardımıyla sabit tutulmuştur (Araujo and Sanchez, 1982), Şekil 12.

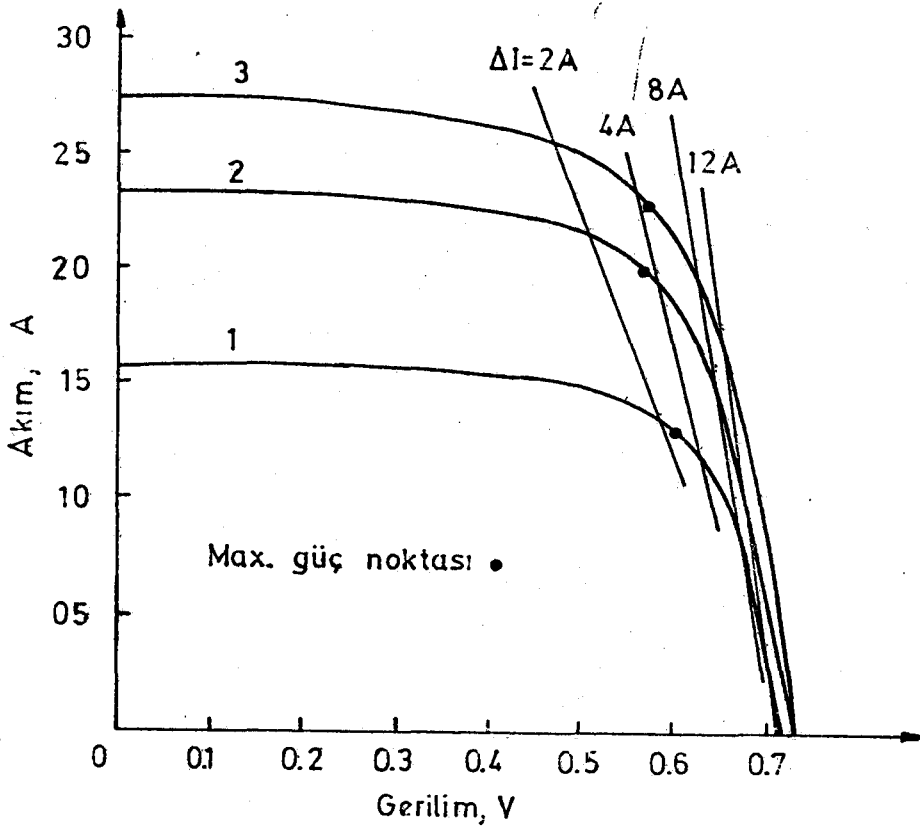
Çizelge 1'de 1. yöntem kullanılarak elde edilen seri direnç değerleri akım artış miktarının farklı değerleri için özetlenmiştir. Alçak ve yüksek değerli aydınlanma seviyeleri arasında bu sonuçların düzeltimi eklem sıcaklıkları arasındaki fark kadar deneysel yapının ısıl direnci değerlendirilerek yapılmıştır. Aşağı yukarı 5 °C'lik bir fark 2mV/°C mertebesinde sıcaklıkla gerilim değişimi hesaba katılarak bulunmuştur. Yeni R_s değerleri

$$\Delta R = \left(\frac{\delta V}{\delta T} \right) \Delta T_j / \Delta I_{sc}$$

ifadesiyle düzeltilmiştir (Cape and Zehr, 1980).

$$\Delta R = 0,7 \text{ mOhm}$$

Düzeltilmiş değerler de Çizelge 1'de görülmektedir.



Şekil 12. Üç farklı aydınlanma seviyelerinde deneysel I-V eğrileri (Araujo and Sanchez, 1982).

Görüldüğü gibi kısa devre akımı azalırken seri direnç artmaktadır. Ayrıca bu farklı değerlerin bir başka nedeni de aydınlatma amacı ile kullanılan Fresnel merceğinden¹ kaynaklanabilir. Bu farklı değerler yüksek aydınlanma seviyelerinde aşıkardır. Başka bir nedeni seri direncin çeşitli bileşenlerinden kaynaklanabilir. Maksimum güç noktası civarında sıcaklıktan kaynaklanan hatanın düzeltilmesiyle R_s değeri 5,5 mOhm olarak bulunmuştur.

¹Fresnel merceği, eğrilik yarıçapı ve yüzeyi büyük, kalınlığı küçük olan ve üzerine gelen ışığı bir bölgede toplayan mercektir.

Çizelge 1. Düzeltilmiş seri direnç değerleri (Araujo and Sanchez, 1982)

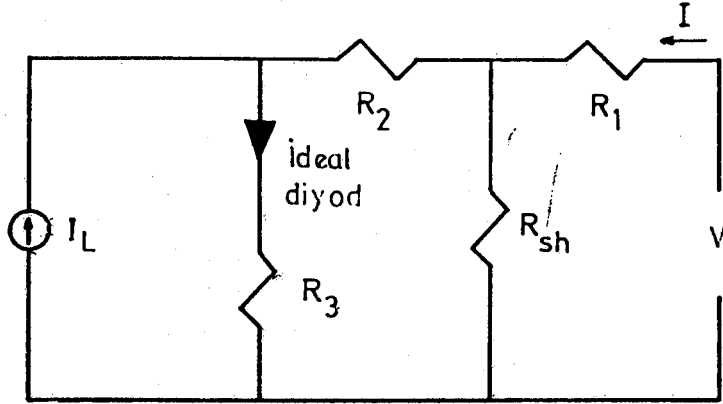
Akım farkı I_{sc} , A	Seri direnç, miliohm		
	Referans metot (Wolf, 1963)	Sıcaklık ta düz. R_s	I-V alanı metodu
2	9.7	9.0	
4	6.2	5.5	
8	3.9	3.2	
12	3.4	2.7	
Max. güç noktası civarında	~ 6.2	~ 5.5	
Eğri 1:			5.4
Eğri 2:			5.5
Eğri 3:			4.8

Şekil 12'deki üç eğrinin altında kalan alan ayrı ayrı trapezoidal kural kullanılarak ve grafikten 12-15 A'lık kısa devre akımları kullanılarak değerlendirilmiş, $n=1$ kabul edildiğinde Çizelge 1'de görülen seri direnç değerleri hesaplanmıştır.

2.4. Farklı Işık Şiddetlerinde Her Kısa Devre Akımına Karşılık Açık Devre Gerilimi ve Karanlık Diyod Gerilimi Ölçüm Yöntemi (4. Yöntem)

Bu modelin başlama noktası Şekil 13'te görüldüğü gibi güneş pilinin eşdeğer devresidir.

Bu model önemli kaba sabitleri (lineer-lineer olmayan) içermesine rağmen yine de matematiksel sadelik sağlar. Çok defa R_2 ve R_3 dirençleri ihmal edilir. Burada R_1 lineer metal kontak dirençleri, R_2 yarıiletken üst tabaka



Şekil 13. Güneş pili eşdeğer devresi (Rajkanan and Shewchun, 1979).

direnci için kaba değer, R_3 taban bulk direnci için kaba değer, R_{sh} farklı kaçak yollar nedeniyle kaba shunt direncini belirtmektedir.

R_2 ve R_3 dirençleri akım bağımlı ve genelde lineer değildir. Çünkü R_2 ve R_3 dirençleri bölünmüş dirençlerin kaba eşdeğerlerini gösterir. Verilen herhangi bir çalışma veya yük noktasında bu model için akım-gerilim bağıntıları

$$I (1 - \delta) - \frac{V + I (R_1 + R_2 + R_3)}{R_{sh}} = I_L - I_0 \left(\exp \frac{V_D}{V_{th}} - 1 \right)$$

(21)

$$\delta = (R_2 + R_3) / R_{sh}$$

$$V_D = [V (1 + \delta) + I (R_1 (1 + \delta) + R_2 + R_3) + I_L R_3]$$

$$V_{th} = nkT / q$$

ile verilir (Rajkanan and Shewchun, 1979).

Burada R_2 ve R_3 değerleri R_{sh} değerinden çok küçük

olduğundan $\delta \ll 1$ olacaktır. Dolayısıyla δ ihmal edilir. Ayrıca herhangi bir güneş pili için $I_L R_3$ terimi $(V + I(R_1 + R_2 + R_3))$ terimine kıyasla ihmal edilebilir. Çünkü R_2 ve R_3 lineer değildir. Ayrıca $(R_1 + R_2 + R_3 + \rho)$ 'yu $R_s(I)$ ile gösterebiliriz, burada $\rho = I_L R_3 / I$ dir. Bu durumlarda Eş.(21)'i

$$I - \frac{V + IR_s(I)}{R_{sh}} = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s(I)}{V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (22)$$

olarak yazabiliriz.

Bu eşitlik, R_2 ve R_3 'ü ihmal ettiğimizde ve R_1 'i R_s ile gösterdiğimizde, basit devre modelinin analizi ile elde edilen eşitlikle aynıdır. Bu model bazı etkilerin ilavesiyle taban direncini, üst tabaka direncini ve kontak direncini içerir.

Birden fazla diyod için akım-gerilim bağıntısı

$$I - \frac{V + IR_s(I)}{R_{sh}} = I_L - \sum_i I_{0i} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s(I)}{V_{thi}} \right) - 1 \right] \quad (23)$$

olarak yazılabilir.

Eş.(22) ve (23)'te $(V + IR_s)$ terimi nedeniyle I-V eğrileri akım yoğunluğuna değil akıma bağlı olduğu görülebilir. Eğer IR_s terimi (akım x güneş pili alanı x R_s) olarak yazılırsa o zaman pil alanı I-V eğrisini etkileyebilen başka bir parametredir. Başka bir deyişle akım-gerilim eğrisinin şekli pilin alanına bağlı olacaktır. Teknoloji ve pil geometrisi optimize olmadıkça (pil alanı x R_s) ve (pil alanı x R_{sh}) alan bağımsız olur. Bu nedenle herhangi bir diyod parametresi I-V eğrisi boyunca değişiyorsa, onun fonksiyonel bağlılığı akım yoğunluğu fonksiyonundan ziyade akım için daha iyi verilir.

Buraya kadar R_s seri direnci güneş pilinden geçen akımın bir fonksiyonu olarak dikkate alınmıştır. Shunt direnci I-V eğrisi boyunca değişebilir. Eğer pilin alanı çok küçükse (veya aydınlatma şiddeti büyük değerli kısa devre akımlarına neden olmayacak kadar küçükse) I_0 , V_{th} , R_s ve R_{sh} parametrelerinde değişim bütün I-V eğrisi üzerinde bir dereceye kadar küçük olabilecektir. Bununla beraber $10-50 \text{ cm}^2$ (Rajkanan and Shewchun, 1979) alanı olan güneş pillerinde $0,25-1,0 \text{ A}$ 'lık kısa devre akımları normal güneş ışığı şiddeti altında kolaylıkla meydana gelir. Bu durumda I-V eğrisi boyunca akıma bağımlı parametreler değişir. Bu parametreler önemlidir. Bu sebeple I-V eğrisinin eğiminden $R_s(I)$ değerini belirlemek için akım bağımlı bu parametreleri bilmek gerekir. Eş.(22)'den

$$\left[\frac{\delta V}{\delta I} \right] = R_s + \frac{V_{th} (1 + R_s / R_{sh})}{(I + I_L + I_0 - (V + IR_s) / R_{sh})} \quad (24)$$

yazılabilir. $(\partial V / \partial I)_I = 0$ terimi sayı değeri olarak kullanılabilir fakat R_s ile karıştırılmamalıdır.

Çoğu kez bir diyoddan fazlası için karanlıkta akım-gerilim bağıntısı

$$I - \frac{V + IR_s(I)}{R_{sh}} = - \sum_i I_{0i} \left[\exp \left(\frac{V + IR_s(I)}{V_{thi}} \right) - 1 \right] \quad (25)$$

olarak yazılabilir.

Güneş pili karanlıkta basit bir diyod gibi beslendiği zaman dış devreden geçen akım diyod ekleminden enjekte edilen akımın ters işaretlisine eşit olduğu Eş.(25)'ten görülebilir. Bu sebepten diyod parametreleri dış devre akımının ters işaretlisine, $-I$, karşı gelecektir. Bununla beraber pil aydınlatıldığı zaman dış devre akımı I için, güneş pili ekleminden enjekte edilen akım $I_L - I$ olacaktır.

Bu durumda diyod parametrelerinde I yerine I_L -I karşı gelecektir.

Şu andaki tartışma için, grid geometride karanlıkta numuneden geçen akımın aydınlatılmış durumdaki akıma benzer olduğu kabul edildi. Numuneden geçen akım numunenin kontak şekline bağlıdır. Eğer numune kontağı optimize ise öyleki kontak parmak açıklığı birkaç "taşıyıcı diffüzyon uzunluğunda", o zaman en üst yarıiletken tabaka eş potansiyelde olacak ve numuneden geçen akım her iki karanlık ve aydınlık durum için aynı olacaktır. Açık devre durumu için Eş.(23)'ten

$$- \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = I_L - \sum_i I_{oi} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_{thi}}\right) - 1 \right] \quad (26)$$

yazabiliriz ve yukarıdaki tartışmayı kullanarak I_L akımında Eş.(25)'i

$$- I_L - \frac{V_d - I_L R_s}{R_{sh}} = - \sum_i I_{oi} \left[\exp\left(\frac{V_d - I_L R_s}{V_{thi}}\right) - 1 \right] \quad (27)$$

olarak yazabiliriz. Buradaki d indisi karanlıkta akım-gerilim eğrisine aittir. Bütün diyod parametreleri $R_s, R_{sh}, I_{oi},$ ve $V_{thi} \rightarrow I_L$ akımına karşılık gelir. Böylece Eş.(26) ve (27)'den

$$- \frac{(V_d - V_{oc}) - I_L R_s}{R_{sh}} = \sum_i \left[I_{oi} \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_{thi}}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{(V_d - V_{oc}) - I_L R_s}{V_{thi}}\right) - 1 \right] \quad (28)$$

yazabiliriz. Eş.(28)'den

$$(V_d - V_{oc}) - I_L R_s = 0$$

olmalıdır². Buradan

$$R_S(I_L) = \frac{V_d(I_L) - V_{oc}}{I_L} \quad (29)$$

olarak yazılır. Eğer $I_{sc} \approx I_L$ ise Eş.(29) yaklaşık olarak

$$R_S(I_{sc}) \approx \frac{V_d(I_{sc}) - V_{oc}}{I_{sc}} \quad (30)$$

formunda da verilebilir.

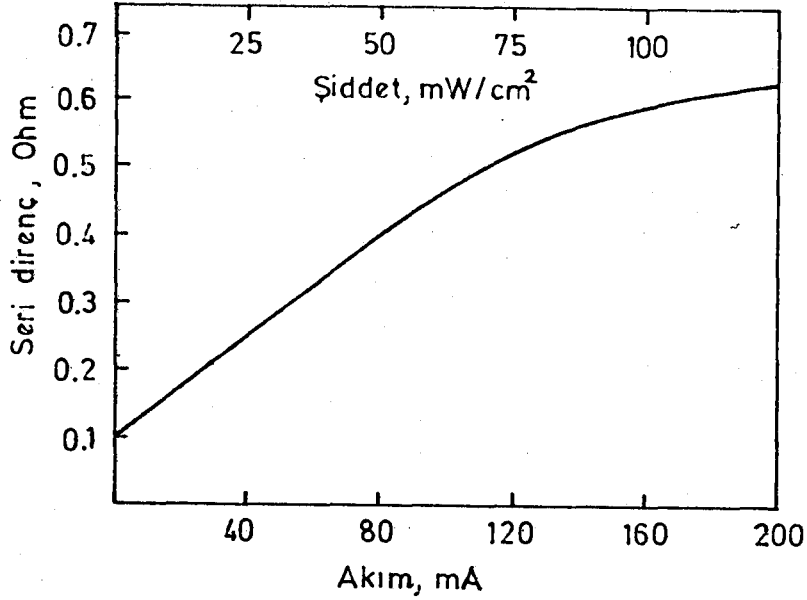
Eş.(26)'dan görüldüğü gibi seri direnç güneş pili açık devre şartını etkilemez. Bu nedenle, arzu edilen akım değerinde V_d ve V_{oc} gerilimleri mukayese edilerek R_S değeri elde edilir. Diyod parametrelerinin akım bağımlılığından dolayı böyle bir hesaplamada hatayı azaltmak için diyod parametreleri, güneş pilinin açık devre şartıyla aynı olan, karanlık I-V üzerinde bir nokta seçilmelidir. Karanlık I-V üzerinde böyle bir noktada $I = I_L$ dir. Çünkü ekseriya $I_L \approx I_{sc}$ alınır. $I \approx I_{sc}$ olarak ta alınabilir.

Ticari bir silisyum güneş pili üzerinde ölçülmüş olan veriler Şekil 14'te görülmektedir.

2.5. Nispeten Yüksek Aydınlanma Şiddetlerinde Işık Şiddetine Karşı Kısa Devre Akımının Çiziminde Lineer Olmayan Durumdan Faydalanılan Yöntem (5. Yöntem)

Aydınlanma şiddeti altında güneş pilinin I-V eğrileri

²Eş.(28)'in her iki tarafının birbirine eşit olması ancak 0 (sıfır) değerinde mümkündür.



Şekil 14. Akım ve aydınlanma şiddetiyle seri direnç değişimi (Agarwal et al, 1981).

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

formunda verilmiştir.

$V = 0$ durumunda Eş.(1)

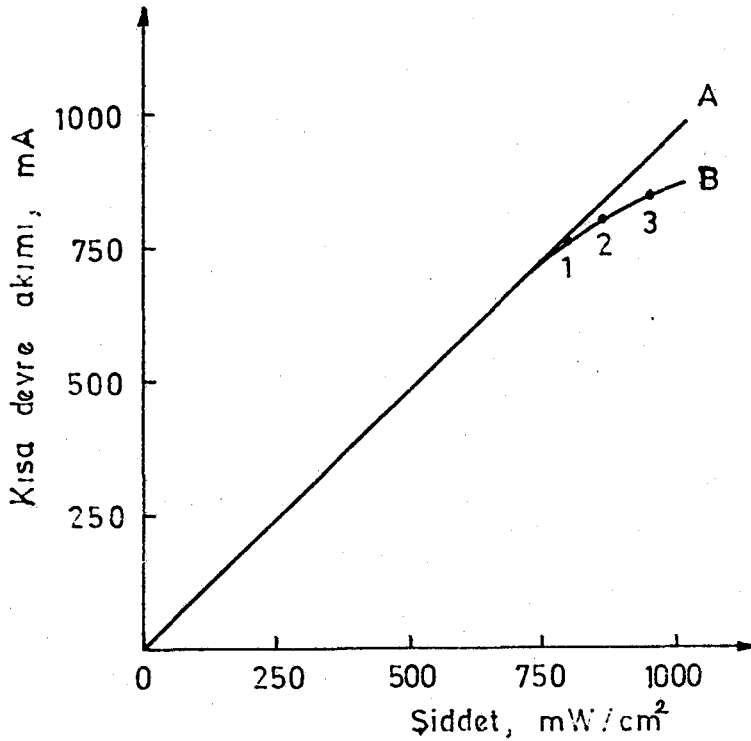
$$I_{sc} = I_L - I_0 \exp\left(\frac{qI_{sc}R_S}{nkT} \right) \quad (31)$$

şeklinde yazılabilir. Eş.(1)'de uygun ışık şiddetlerinde 1 (bir) değeri ihmal edilmiştir. Eş.(31)'de eğer $I_{sc}R_S$ ihmal edilirse I_{sc} aydınlanma şiddetiyle lineer olarak değişir. Bununla birlikte aydınlanma şiddeti artarken I_{sc} de artar. $I_0 \exp(qI_{sc}R_S/nkT)$ terimi I_L 'nin yanında ihmal edilmediği durumda, I_{sc} aydınlanma şiddetiyle lineer olmayan bir değişim gösterir. Doğruluktan sapma seri direncin bir belirtisidir ve seri direncin değerini hesaplamada kullanılabilir.

Eş.(31)'i düzenlersek

$$\ln[(I_L - I_{sc}) / I_0] = qI_{sc}R_s / nkT \quad (32)$$

olur. I_{sc} 'ye karşı $\ln(I_L - I_{sc})$ 'nin eğimi $s = qR_s/nkT$ olan bir doğru olacaktır. Eğer diyod idealite faktörü n , bilinirse R_s eğimden hesaplanabilir. Yapılan deney sonucunda ölçülen I_{sc} değerleri Şekil 15'te ışık şiddetinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir (Agarwal et al, 1981)

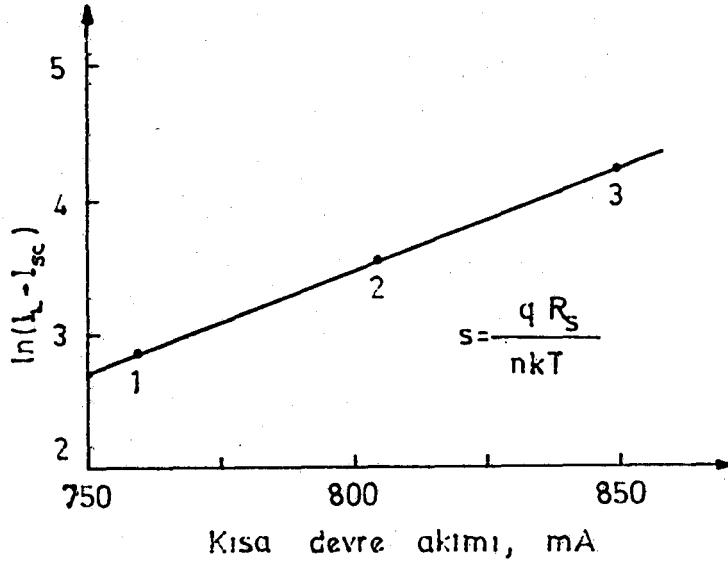


Şekil 15. Aydınlatma şiddetinin bir fonksiyonu olarak I_{sc} kısa devre akımının ölçülen değerleri I_{sc} (Agarwal et al, 1981).

Şekil 15'ten görüldüğü gibi I_{sc} yaklaşık 500 mW'a kadar I_L ile lineer bir değişim göstermekle beraber, lineer durumdan ayrılma 700 mW/cm²'den sonra açıkça gözlenmektedir.

Daha önceden tartışıldığı gibi lineer bölgede $I_{sc} \approx I_L$ dir. Çünkü I_L daima aydınlatma şiddetiyle lineer

olarak değişir. Şekil 15'te doğru çizgi I_L 'yi belirtir. Bu iki eğriden $\ln(I_L - I_{sc})$ hesaplanarak Şekil 16'da I_{sc} nin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Eğrinin bir doğru olduğu ve teoriyle uyumlu olduğu gözlenmektedir. Eğer $n=1$ kabul edilirse R_s değeri 0,38 Ohm olarak bulunur.



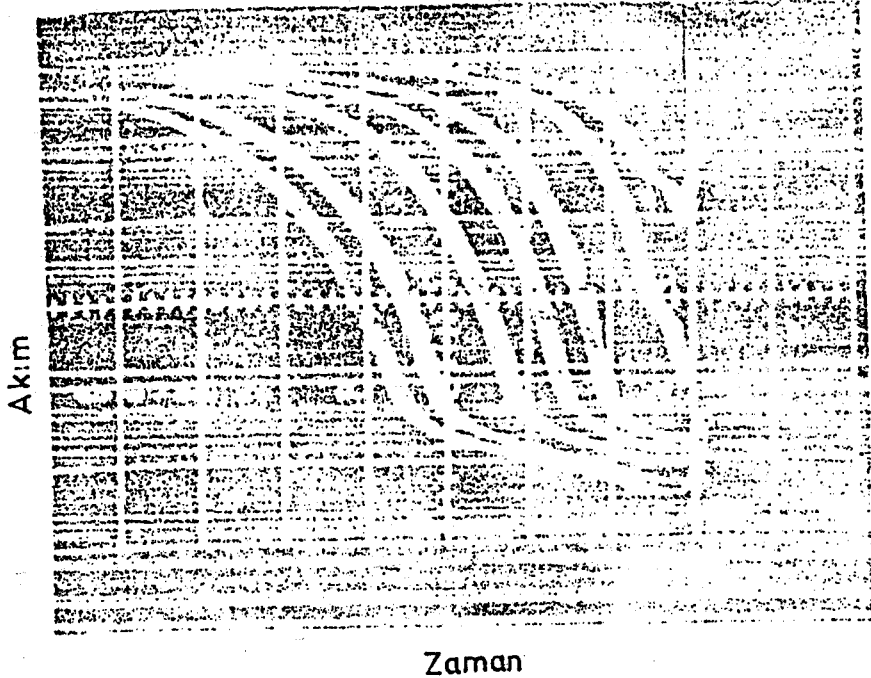
Şekil 16. I_{sc} 'nin bir fonksiyonu olarak Şekil 15'te elde edilen $\ln(I_L - I_{sc})$ 'nin grafiği (Agarwal et al, 1981)

1.6. Flash Testing Yöntemi (6. Yöntem)

Bu yöntemde dikkatimiz kısa devre durumuna toplanacak yani $R_L \rightarrow 0$ olacaktır. R_L gerçekte 0 (sıfır) değeri alamayacak fakat 0,01-0,1 Ohm değerinden küçük değerler alabilecek ve viewing resistor akımı (CVR) olarak kullanabileceğiz (Chaffin and Osbourn, 1980). Bu yöntemde kullanılan ışık kaynağı kolayca temin edilebilen kameralar için yapılmış flaştır.

Şekil 17'de görülen eğriler farklı ışık şiddeti değerleri için güneş pilinin "time response"dır. Burada güneş pili ve flaş arasındaki mesafenin değişmesiyle ışık şiddeti de değişmektedir. Düşük ışık şiddetlerinde güneş

pili flaşın zamansal karakteristiklerine uyar. Işık şiddeti artarken toplam pil akımı doyuma ulaşmaya başlar.



Şekil 17. Fotoflaş ünitesiyle aydınlanmada güneş pili time response (Chaffin and Osbourn, 1980)

Şekil 17'de en üst konumdaki eğri birkaç bin güneş şiddeti peak'ine karşılık gelir. Bu bölgede pil akımı peak değeri ışık şiddetiyle logaritmik olarak artar. Düşük ışık şiddetlerinde terminal akımı ışık şiddetiyle lineer olarak artar. Bu etki temel güneş pili I-V eşitliğinden anlaşılabilir.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp(qV' / nkT) - 1 \right] \quad (1)$$

Doyum etkisinin açıklanması bu eşitlikten görülebilir. I aydınlanması altında R_L ve R_S üzerinde büyük bir gerilim düşmesi meydana gelir. Bu gerilim V' dür ve diyod da meydana gelen ileri enjeksiyona neden olur. Böylece pilde net akım azalır. Bu durumda Eş.(1)'i

$$I = I_L - I_0 \left(\exp\left[\frac{qI}{nkT}(R_S + R_L)\right] - 1 \right) \quad (33)$$

olarak yeniden yazılabilir.

Eğer $I \gg I_0$ olarak kabul edersek Eş.(33) 'ü

$$I_L \approx I + I_0 \exp\left[\frac{qI}{nkT}(R_S + R_L)\right] \quad (34)$$

şeklinde düzeltebiliriz.

Uygun ışık şiddetlerinde $I_L \approx I$ olarak kabul edebiliriz ki, bu, güneş pilleri için normal çalışma sistemidir $I_0 \exp\left(\frac{qI}{nkT}(R_S + R_L)\right) \gg I$ olan çok yüksek ışık şiddetlerinde

$$I_L \approx I_0 \exp\left[\frac{qI}{nkT}(R_S + R_L)\right] \quad (35)$$

olarak veya

$$I \approx \frac{nkT/q}{R_S + R_L} \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) \quad (36)$$

olarak yazılabilir.

Eş.(36)'yı güneş pilinin seri direncini hesaplamak için kullanabiliriz. Değerleri bilinen iki farklı R_L direnci kullanırız. Elde edilen maksimum ışık şiddetinde ölçümler yapılarak R_S değerini buluruz. Mademki I_L sabit olacak o zaman R_S 'yi

$$R_S = \left[(I_2 R_{L2} - I_1 R_{L1}) / (I_1 - I_2) \right] \quad (37)$$

olarak gösterebiliriz. 1 ve 2 indisi birinci ve ikinci yük direnci ölçüm sonuçlarına aittir. En iyi sonuç R_L tahmin edilen R_S basamağında olduğu zaman meydana gelecektir. Çünkü eşitliğin sağ tarafındaki niceliklerin tamamı

bilinir veya kolayca ölçülebilir. Dolayısıyla pil seri direnci hesaplanabilir (Chaffin and Osbourn, 1981).

3. SERİ DİRENCİN ÇEŞİTLİ PARAMETRELERE BAĞLILIĞI

3.1. Seri Direncin Deneysel Hesaplanmasında Diyod İdealite Faktörünün Etkisi

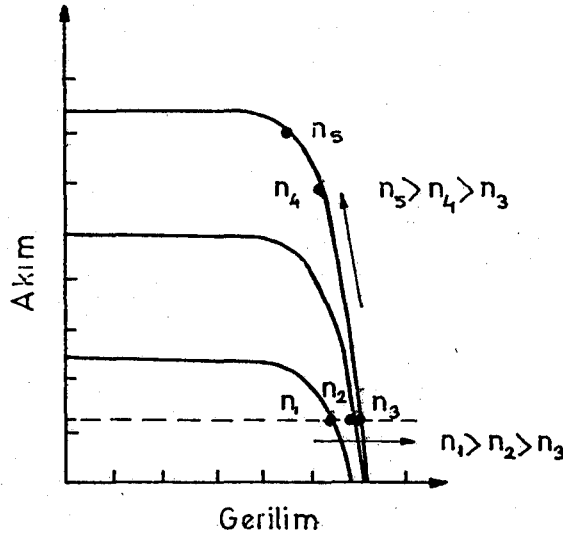
Bazı yöntemlerde diyod idealite faktörünün tahmini değeri kullanılmıştır. Bu tahmin bütün aydınlanma şiddetlerinde tam doğru değildir ve sonuçta R_s değeri hatalı olarak bulunur.

Diyod idealite faktörü n , diyod ekleminden akan akıma bağlıdır. Diyod akımı çeşitli diyod akımları toplamıdır. Bunlar yarı nötr eklem bölgesinde diffüzyon bileşeni, uzay yük bölgesinde oluşum-birleşim bileşeni ve yüzey bileşenidir. Bu bileşenlerin bazıları I-V eğrilerinin farklı bölümlerinde etkili bir üstünlük kazanır. Örneğin diffüzyon bileşeni büyük ileri beslemede dominanttır ve diyod idealite faktörü $n=1$ olarak alınır. Bununla birlikte, oluşum-birleşim bileşeni küçük besleme durumunda dominanttır. Burada diyod idealite faktörü bir'den (1) büyüktür.

Güneş pilinde diyod akımı ışık şiddeti seviyesine ve terminal akımına bağlıdır. Bu Şekil 4'ten görülebilir.

Sabit bir terminal akımında (I), ışık şiddeti değeri artarken diyod akımı da (I_0) artar ve bu nedenle ışık oluşum akımı (I_L) artar. Yeterince yüksek değerli aydınlanma şiddetinde diffüzyon akımının baskın olmasından dolayı diyod akımı yeterince büyük değere ulaşabilir ve n değeri 1 (bir) alınır. Bununla beraber, sabit bir ışık şiddetinde terminal akımı artarken diyod akımı azalır. Bu tür şartlar altında n değeri I-V eğrisi boyunca değişir. Açık devre gerilim noktası civarında diyod ekleminden geçen akım yüksektir ve diffüzyon nedeniyle n değeri 1 (bir) olarak alınır. Bununla birlikte, I-V eğrisinin kavisi boyunca terminal akımı, küçük olan diyod akımı sebebiyle, maksimum değerine yakındır ve n değeri 1'den (bir) büyüktür. Şekil 18'de bir güneş pilinin diyod idealite faktörünün

terminal akımı ve ışık şiddeti ile değişimi görülmektedir. Ayrıca çok yüksek değerli aydınlanma şiddetlerinde I-V eğrisinin bir doğruya yaklaştığını unutmamalıyız. Bu şartlar altında difüzyon akımı hemen hemen bütün I-V eğrisi boyunca dominant olur. Bu sebeple n değeri 1 (bir) olarak alınır.



Şekil 18. Terminal akımı ve ışık şiddetiyle diyod idealite faktörünün değişimi (Hamdy and Call, 1987)

n değeri teorik olarak 1-5 arasında değişmektedir. Fakat yapılmış olan deney sonuçlarına göre 1-2 arasında bir değişim gösterdiği anlaşılmıştır. Örneğin silisyum için 1,5 civarındadır. n değeri sıcaklıkla eksponensiyel olarak azalmaktadır. Şekil 19'da diyod idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi görülmektedir.

3.2. Aydınlanma Şiddeti ve Sıcaklıkla Seri Direnç Değişimi

Sıcaklık ve aydınlanma şiddetinin bir fonksiyonu olarak seri direncin incelenmesi önemlidir. Çünkü sıcaklık ve aydınlanma şiddeti maksimum güce ulaşmak için dış devreyle güneş pili uyumu için gerekli optimum yük ve çıkış

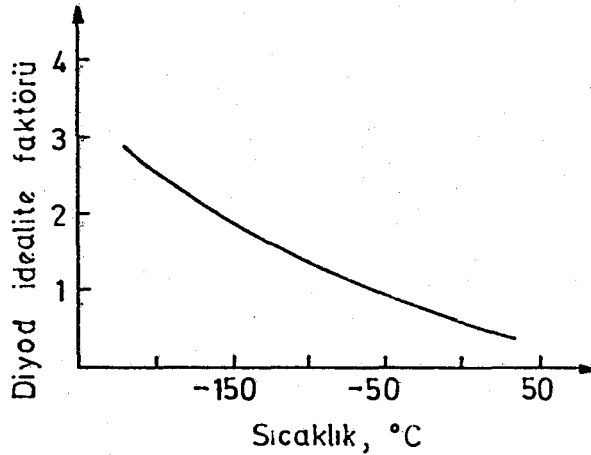
gücünü etkiler. Bu sebeple sıcaklık ve aydınlanma şiddeti ile seri direnç değişimini ve düşük sıcaklıklarda seri direnci ölçmek önemlidir.

Burada single kristal ve poly kristal silisyum güneş pillerinin diffüzyonlu bölgesi için aydınlanma seviyesi ve sıcaklıkla seri direncin değişimi üzerine deneysel sonuçlar belirtilmiştir. Ölçümler 100-500°K arasındaki sıcaklıklarda ve farklı aydınlanma seviyelerinde yapılmıştır (Arora et al, 1986).

Işık oluşum akımı kısa devre akımına eşit olarak kabul edildiğinde $R_{sh} \gg R_s$ 'e sahip güneş pilleri için akım-gerilim eşitliğinin mümkün bir çözümü

$$V_d - I_{sc} R_s - V_{oc} = 0 \quad (38)$$

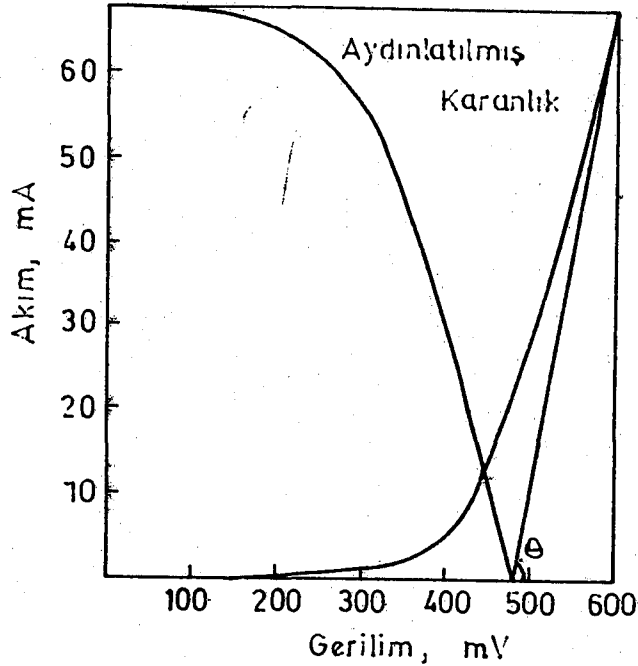
ile verilir. Burada V_d karanlık durumda I_{sc} 'ye karşılık



Şekil 19. Diyod idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi (Köse, 1986).

gelen gerilimdir. Şekil 20'de görüldüğü gibi aynı orijin üzerinde karanlıkta ve aydınlıkta I-V eğrilerinin çizimiyle R_s değeri, $(V_{oc}, 0)$ ve (V_d, I_{sc}) noktalarını birleştiren doğrunun eğiminden hesaplanmıştır. (Mathur et al, 1982).

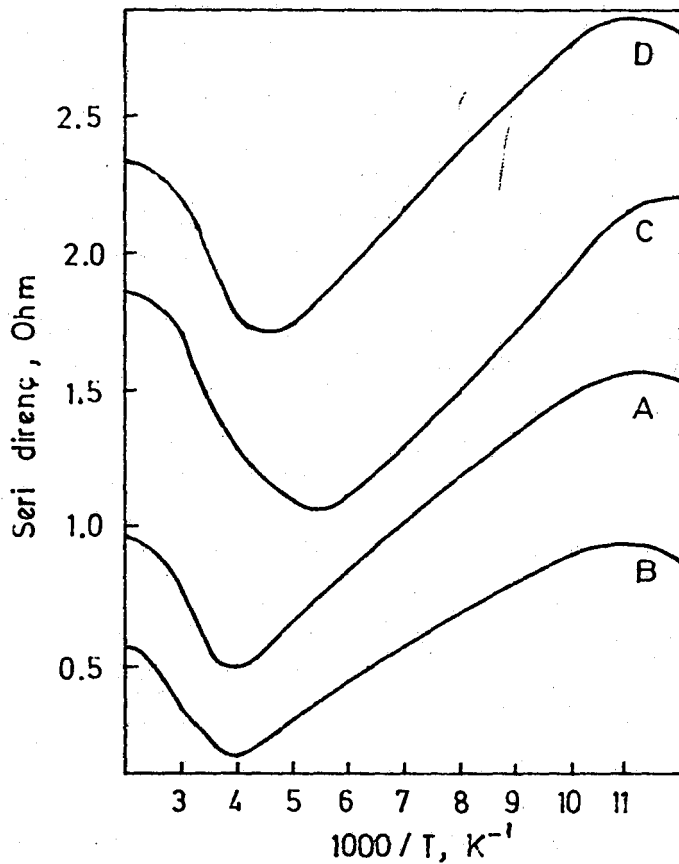
Single kristal ve poly kristal silisyum güneş pille-



Şekil 20. Seri direnç ölçümü için aydınlıkta ve karanlıkta I-V eğrileri (Arora et al, 1982).

ri için sıcaklıkla R_s 'in gözlenen değişimi Şekil 21 ve 22'de görülmektedir. R_s minimum değerinden itibaren, her iki tarafta R_s 'nin arttığı aşıkardır. Bu artış düşük sıcaklık bölgesinde, yüksek sıcaklık bölgesine göre, daha keskindir. Bununla beraber düşük sıcaklık bölgesinde R_s nin artışı poly kristal silisyum güneş pillerinde diğerine göre daha keskindir. R_s 'in sıcaklığa göre gözlenen davranışı seri direncin çeşitli bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Oda sıcaklığının üzerinde elektrotların kontak dirençleri ihmal edilir ve taban bulk direncin katkısı küçüktür. Yalnız diffüzyonlu bölgenin direnci seri dirençte dominanttır ve sıcaklıkla artar. Taban bulk direnç sıcaklığın artmasıyla azalır. Bu azalma poly kristal silisyumda orta sıcaklık bölgesinde çok hızlıdır. Sonuçta R_s poly kristal silisyum pillerinde düşük sıcaklık bölgesinde T ile hızla azalır.

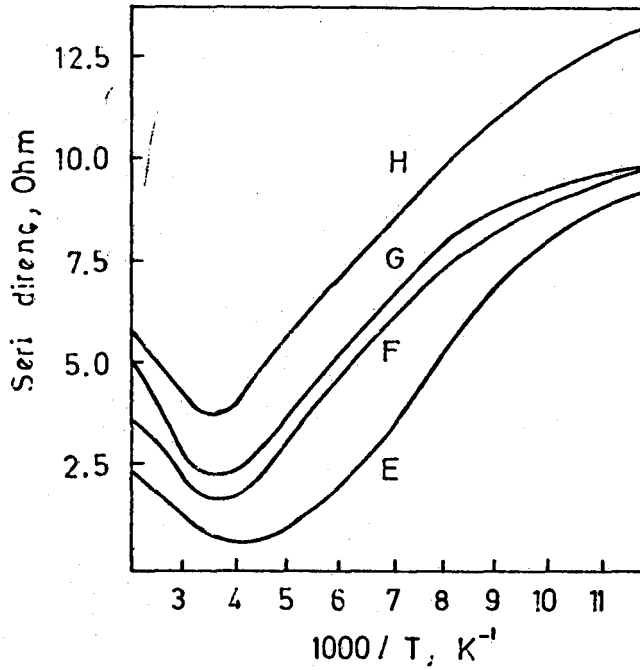
Çok düşük sıcaklıklarda, R_s değerinde üst-alt kontak dirençleri ve taban bulk direnci dominanttır. Sıcak-



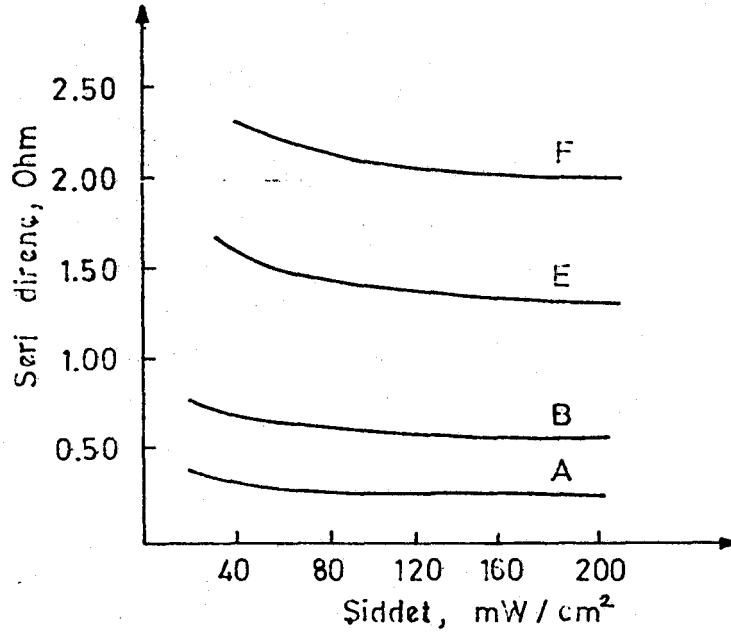
Şekil 21. A, B, C, D single kristal silisyum pillerinde R_s 'in sıcaklıkla değişimi (Arora et al, 1982).

lık artarken, kontak direnç keskin olarak azalır, taban bulk direnç yavaş olarak azalır. Toplamı diffüzyonlu bölge direncindeki bir artışla oda sıcaklığı civarında dengededir.

80 mW/cm² ışın şiddetine kadar şiddetin artmasıyla R_s 'in azaldığı Şekil 23'ten görülebilir. R_s 'in bu davranışı, daha önce yazılan eşitlikten gözlemlendiği gibi, V_d ve V_{oc} 'nin şiddete I_{sc} 'den daha az bağlı olmasındandır. R_s 'in azalması için başka bir neden şiddetin artmasıyla aktif tabakanın iletkenliğindeki artma olabilir. Poly silisyum güneş pilleri için sonuçlar da benzerdir.



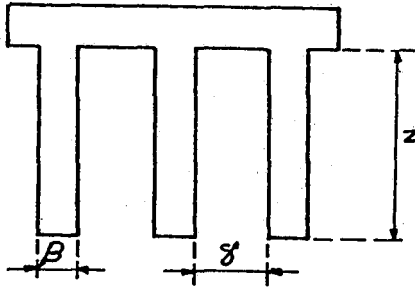
Şekil 22. E,F,G,H poly kristal pillerinde R_s 'in sıcaklıkla değişimi (Arora et al, 1982).



Şekil 23. A,B,E,F pilleri için yüzeye düşen ışık şiddetiyle R_s 'in değişimi (Arora et al, 1982)

3.3. Metal Kontak Parmakların Seri Dirence Etkisi

Güneş pillerinde elektrik kontağını sağlayan üst kafesin parmak sayılarının artması seri direncin değerini azaltır. Ancak parmak sayısının uygun olarak arttırılması gerekir. Bunun yanında parmaklar arası mesafenin, parmakların yüzey genişliğinin ve parmak kalınlığının da uygun olarak seçilmesi gerekir, Şekil 24.



Şekil 24. Güneş pilinin üst yüzey metal kontak parmakları (Köse, 1986).

Kafes parmakların genişliği β , uzunluğu z , iki parmak arası δ ile gösterilirse uygun bir parmak seçimi için β ve δ aşağıdaki gibi verilir (Wolf, 1960).

$$\beta = 2^{5/4} \frac{R_k^{3/4}}{R_p^{1/2}} (BCJ_o e^{BV_1})^{1/4} z^{3/2} \quad (39)$$

$$B = q/nkT$$

$$C = 1 - \frac{J_o}{J_f} (e^{BV_1} - 1) \quad (40)$$

$$\delta = \left(\frac{2\beta}{BCR_p J_o e^{BV_1}} \right)^{1/2} - \frac{2}{3} \beta \quad (41)$$

Burada R_k metal kontağın bir parmağının tabaka direncini,

R_p p-tabakasının direncini ve J_0 güneş pilinin diyod doyum akım yoğunluğunu ve V_1 güneş pilinin çıkış gerilimini gösterir.

Güneş pilinin üst metal kafes kontağın parmak yüzey genişliği büyük olursa pilin ışınlarla karşı aktif yüzeyi azalacak dolayısıyla pilin terminal akımı azalacaktır. Küçük alındığı zaman metal kontağın direnci artacak ve yüzey birleşimlerinden dolayı metal kafes, taşıyıcı yükleri toplayamayacak ve güneş pilinin çıkış gücü azalacaktır. Bundan dolayı metal kafes parmak sayıları, parmak yüzey genişlikleri optimum değerde olması gerekir.

$1 \times 2 \text{ cm}^2$ yüzeyli bir güneş pili için optimum parmak sayısı 5, herbir parmağın genişliği $6 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ve iki parmak arası mesafe 0,4 cm olmalıdır.

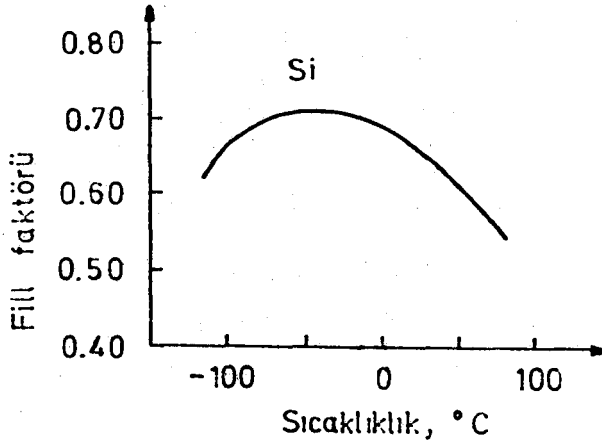
3.4. Seri Direncin Verime Etkisi

Güneş pilinin verimi onun kalitesini belirtmesi açısından önemlidir. Verim ne kadar yüksek olursa pil o derece kalitelidir.

Güneş pillerinin davranışı üç temel parametre içerisinde incelenir. Birincisi, açık devre gerilimidir. Açık devre gerilim V_{oc} , pilin dış devresine bağlanmış yük direnci R_L devre direncinden çok daha büyük olduğu durumdaki gerilimdir. Bu yük direncinin büyük olması nedeniyle devreden herhangi bir akım geçmez. İkincisi, kısa devre akımıdır. Bu akım, devre direncinin pilin dış devresine bağlanmış yük direncinden büyük olduğu zaman, yük direncinden akan akımdır. Üçüncüsü, pilin maksimum çıkış gücünün V_{oc} ve I_{sc} 'nin çarpımlarına oranı olan "fill faktörü"dür. Bu üç parametre güneş pilinin verimini belirtirler (Millman and Halkias, 1984).

Fill faktörü (FF) güneş pili seri direncinden etkilenir. Seri direncin büyüklüğü FF'yi küçültür. FF'nin

değeri daima 1'e (bir) yakın olması istenir. İdeal bir güneş pili için FF'ü, 1'e (bir) eşittir. FF' nün büyük olması güneş pilinin veriminin yüksek olduğunu belirtir. FF'nün sıcaklıkla değişimi Şekil 25'te görülmektedir. FF'ü



Şekil 25. Fill faktörünün sıcaklıkla değişimi (Millman and Halkias , 1984).

$$FF = \frac{J_{\max}}{V_{oc}} \left(\frac{e^{qV_{\max}/nkT}}{e^{qV_{oc}/nkT}} \right) \quad (42)$$

olarak verilir (Millman and Halkias, 1984).

Güneş pilinin seri direncinden dolayı akım-gerilim eğrisinde bir sapma meydana gelir (Şekil 26). Seri dirençten ileri gelen kayıplar pil teknolojisinin gelişmesiyle azaltılabilir. Seri dirençten geçen akım I_s , seri direnç R_s ve direnç üzerinde harcanan güç P_s ise

$$P_s = I_s^2 R_s \quad (43)$$

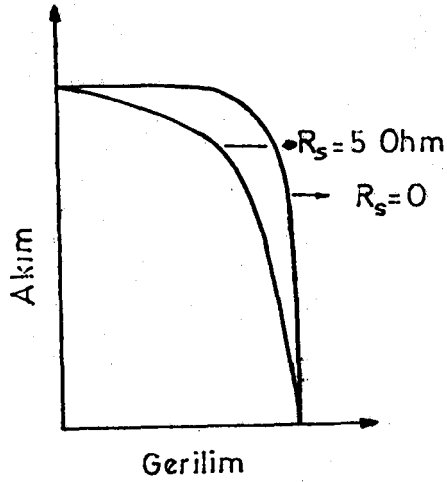
veya

$$P_s = (I_L - I_0 \left(e^{\frac{q}{nkT}(V_d + I_s R_s)} - 1 \right)) R_s$$

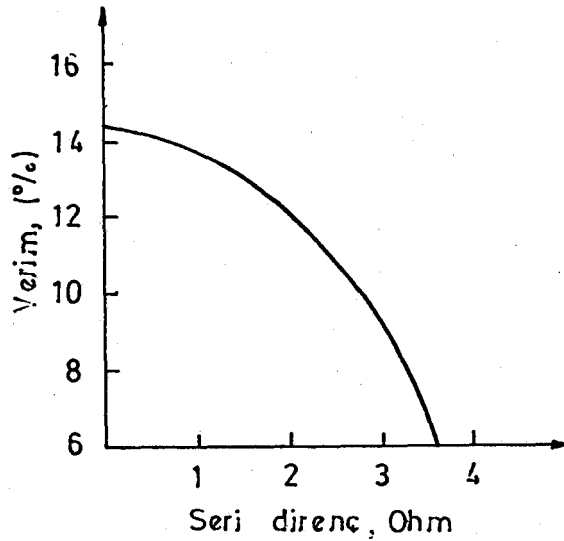
ile verilir. I_s aynı zamanda pil çıkışındaki yük diren-

cinden geçen akıma eşittir.

Fotovoltaik bir güneş pilinin dönüşüm verimi pilin çıkış gücünün pil üzerine gelen ışınların gücüne oranı olarak verilir. Şekil 27'de görüldüğü gibi seri direnç artarken verim düşmektedir.



Şekil 26. Seri direncin I-V eğrisine etkisi (Paletta 1985).



Şekil 27. Verimin seri dirençle değişimi (Köse, 1986)

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

1. Yöntem herhangi bir güneş pili'nin seri direncinin kolay hesaplanmasına imkan verir. Bu amaç için photo-voltaic output karakteristiği büyüklüğü bilinmek zorunda olmayan iki farklı ışık şiddetinde ölçülmek zorundadır. Ayrıca karakteristiğin farklı bölümlerinden elde edilen seri direnç değerleri ve eğrilerin transferi arasındaki uyum ölçülen bütün güneş pillerinde bulunmayabilir.

2. Yöntemde uygun bir ışık şiddeti altında tek bir I-V eğrisinden yararlanılmıştır. Tek bir I-V eğrisi kullanılarak elde edilen seri direnç değerlerinin 1. yöntemle uyumlu olduğunu not etmek ilginçtir. 5. Yöntem ve diğerlerinde I_{sc} kısa devre akımı ve I_L ışık oluşum akımı arasında bir fark oluşması için bir dereceye kadar yüksek aydınlanma şiddeti (800 mW/cm^2 den büyük) gerekir. Bu durumda sıcaklığın mümkün olduğunca sabit kalması için ayrıntılı bir şekilde hazırlanan soğutma düzeni gerekir.

3. Yöntemde I-V eğrisinin altındaki alanın hesaplanmasında integralin özel niteliğinden yararlanılmıştır. Diğer yöntemlerde ölçümler arasındaki sıcaklık farkından dolayı ileri sürülen hatalardan kaçınan bu yöntemde yalnız bir I-V karakteristiği kullanılmıştır.

4. Yöntemde seri direnci belirlemek için farklı çalışma şartlarından yararlanılmıştır. Seri direnç açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve bu akıma karanlık I-V eğrisinde karşı gelen gerilimde elde edildi. Diğer yöntemlerden farklı olarak önceden bilinen akım bağımlı diyod parametrelerine veya farklı ışık şiddetlerinde I-V eğrilerine ihtiyaç vardır.

5. Yöntemde seri direnci belirlemek için ışık şiddetinin bir fonksiyonu olarak kısa devre akımının ölçülmesi ve diyod idealite faktörünün bilinmesi gerekir. Burada

ışık şiddetinin tam değerini ölçmek zorunluluğu yoktur. Bilinen bir oran yardımıyla yüzeye çarpan ışık şiddetini değiştirmek yeterlidir. 1. ve 4. yöntemlerde kısa devre akımı ışık oluşum akımına eşit olarak kabul edildi. Bu tahmini yaklaşım yalnız düşük ışık şiddetlerinde geçerlidir. 5. yöntem yüksek ışık şiddetlerinde ışık oluşum akımından kısa devre akımının sapmasına bağlıdır. Çünkü güneş pilinin performansına seri direncin etkisi yüksek ışık şiddetlerinde daha fazladır. Bu yöntem düşük şiddetlerde seri direnci vermeyebilir. Bu nedenle düşük ışık şiddetlerinde diğer yöntemlerden yararlanmak gerekir.

5. yöntemin en önemli dezavantajı, ölçümler mevcut olan doğrudan kısa devre akımının saptığı-yüksek ışık şiddetinde $I_{sc}=I_L$ durumunda- yerde düşük ışık şiddetlerinden eğrinin şeklinin değiştiği şiddetlerde yapılmak zorundadır. Eğer bu bölgede n diyod idealite faktörü sabit değilse kısa devre akımına karşı $\ln(I_L-I_{sc})$ 'nin çiziminde lineer olmayan durum hesaba katılmalıdır. Doğrusal olmayan bu çizgiye seri direncin ışık şiddetine bağlılığı da neden olabilir. Böylece bu yöntem $\ln(I_L-I_{sc})$ 'nin I_{sc} 'ye bağlılığı lineer olmayan yerdeki şiddetlerde güvenilir olmayabilecek fakat R_s veya n'in ışık şiddetine bağlılığını doğrudan doğruya gösterme avantajına sahiptir.

Bununla birlikte, yüksek aydınlanma seviyelerinde depletion bölgesinin genişliği p-n eklemi üzerinde ani düşen gerilime ($I_{sc}R_s$) bağlı olarak değişir. Bu durumda kısa devre akımı ışık oluşum akımı ile lineer olmayan bir değişim gösterebilir. Depletion bölgesinin genişliğindeki değişime bağlı olarak toplam I_{sc} 'de değişim %0,2'den azdır ve böylece ihmal edilir.

6. Yöntemde seri direnç değeri bilinen iki farklı R_L direncinde, maksimum ışık şiddeti kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntem yüksek değerli ışık şiddetlerinde ve açık devre durumunda etkilidir.

Bu çalışmada incelenen yöntemlerde diyod idealite faktörü tüm I-V eğrisi boyunca sabit kabul edilmiştir. Bu kabul bütün aydınlanma seviyelerinde tam doğru değildir ve R_s değerinin hesaplanmasında hatalı sonuçlara götürür. Diyod idealite faktörü n , normal şartlar altında I-V eğrisi boyunca değişir. Maksimum güç noktası yakınında $n=1$ olur ve açık devre gerilimi civarında 1'e yaklaşır. Bununla beraber aydınlanma şiddeti seviyeleriazaldıkça I-V eğrisi alışılmış şeklinden sapmaya başlar. Terminal akımı kısa devre yerine negatif bir terminal geriliminde I_L 'nin maksimum değerine ulaşır. Neticede çok yüksek değerli aydınlanma seviyelerinde I-V eğrisi bir doğruya yaklaşır. Bu durumda bütün I-V eğrisi boyunca diyod idealite faktörü n 'in bir (1) ve sabit olduğunu kabul etmek uygundur. Böylece uygun bir R_s değeri elde edilir.

İki I-V eğrisi kullanan yöntemler tek bir I-V eğrisi kullanan yöntemlere göre birkaç avantaja sahiptir. R_s 'in hesaplanması diyod idealite faktörü n 'den bağımsızdır. Bu aynı diyod akımı ve bundan dolayı aynı diyod idealite faktörü n değerine sahip iki farklı çalışma noktası arasında karşılaştırma yapılarak R_s değerinin hesaplanmasındandır. Bu nedenle herhangi bir güneş pilinde R_s değeri karakteristikteki çalışma noktasında herhangi bir yaklaşım yapmadan belirlenebilir. Üstelik R_s 'in hesaplanmasında kullanılan eşitlikler basit ve tek bir I-V eğrisi kullanan yöntemlerde bulunan çoğu parametreleri kapsamaz. Parametrelerin az olmasından dolayı bu parametrelerin grafikten okunmasında belirsizlik daha az ve bu nedenle R_s değeri daha hassas belirlenir. Bununla beraber tek bir I-V eğrisi kullanan yöntemler n 'in fonksiyonu olan R_s değerini verir.

İki I-V eğrilerinden elde edilen ölçümleri kullanan yöntemlerin daha güvenilir olduğu görülür. Çünkü farklı aydınlanma seviyelerinde hemen hemen sabit bir R_s değeri

verirler. Bu n ve I_0 gibi diğer güneş pili parametrelerinden bağımsız olarak R_s 'in belirlenmesindedir.

Ayrıca yüksek değerli aydınlatma şiddeti ve sıcaklık şartlarında kısa devre akımı ışık oluşum akımı olarak kabul edilemez. Böyle bir kabul sıfır seri dirençli ideal güneş pillerinde ve yeterince düşük değerli ışık şiddetlerinde yapılabilir. Seri direnç ve terminal akım değerleri çarpımının 250 mV'u aşan yeterince yüksek değerli ışık şiddetlerinde, kısa devre akımı ışık oluşum akımı ile özdeş olarak dikkate alınabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agarwall, S. K., Muralidharan, R., Agarwala, A., et al., 1981, A new method for the measurement of series resistance of solar cells, Journal Physics D. Appl. Phys., 14, 1643-1646.
- Araujo, G. L. and Sanchez, E., 1982, A new method for experimental determination of the series resistance of a solar cell, IEEE Trans. Elec. Dev. ED-29, 10, 1511-1513.
- Arora, J. D., Verma, A. V. and Bhatnagar, M., 1986, Variation of series resistance with temperature and illumination level in diffused junction poly-and single-crystalline silicon solar cells, Journal of Materials Science Letters, 5, 1210-1212.
- Avaritsiotis, J. N., 1985, The efficient exploitation of photovoltaic electricity, Solar Cells, 14, 261-270.
- Cape, J. A. and Zehr, S. W., 1980, Effects of temperature variation in concentrator cell series resistance measurements, Proc. 14 th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 437-441.
- Chaffin, R. J. and Osbourn, G. C., 1980, Measurement of concentrator solar cell series resistance by flash testing, Appl. Phy. Lett., 37, 7, 637-639.
- Hamdy, M. A. and Call, R. L., 1987, The effect of the diode ideality factor on the experimental determination of series resistance of solar cells, Solar Cells, 20, 119-126.
- Handy, R. J., 1967, Theoretical analysis of the series resistance of a solar cell, Solid State Electron, 10, 765-775.
- Hovel, H. J., 1975, Semiconductors and semimetals, Academic Press, New York, 11, 254 p.
- Imamura, M. S. and Portschteller, J. I., 1970, An evaluation of the methods of determining solar cell series resistance, Procc. 8 th IEEE Conf. Photovoltaic Specialist, 102-109.
- Köse, S., 1986, Yarıiletken güneş pilleri ve verimlilikleri Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, 78 s. (yayımlanmamış).
- Mathur, P. C., Shrivastava, R., Sharma R. P., et al., 1982, Graphical method for the evaluation of series

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- resistance in solar cells, *Int. J. Electronics*, 52, 6, 589-595
- Millman, J. and Halkias, C. C., 1984, *Elektronik Düzenler ve Devreleri (Çev. Y. Leblebici)*, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, 2, 256 s.
- Neugroschel, A., Lindholm, F. A. and Sah, C. T., 1977, A method for determining the emitter and base lifetimes in p-n junction diodes, *IEEE Trans. Elec. Dev.* ED-24, 6, 662-671.
- Paletta, F., 1985, Cise experiences on GaAs solar cells for terrestrial and space uses, *International Centre For Theoretical Physics, Trieste (ITALY)*, 22 p.
- Pulfrey, D. L., 1978, *Photovoltaic power generation*, Van Nostrand Reinhold Comp., New York, 218 p.
- Rajkanan, K. and Shewchun, J., 1979, A better approach to the evaluation of the series resistance of solar cells, *Solid-State Electronics*, 22, 193-197.
- Sayıgh, A. A. M., 1977, *Solar energy engineering*, Academic Press, New York, 506 p.
- Singh, V. N. and Singh, R. P., 1983, A method for the measurement of solar cell series resistance, *Journal Phys. D: Appl. Phys.*, 16, 10, 1823-1825.
- Smirnov, G. M. and Mahan, J. E., 1980, Distributed series resistance in photovoltaic devices: intensity and loading effects, *Solid-State Electron*, 23, 1055-1058.
- Wolf, M., 1960, Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters *Proc IRE*, 48, 1246-1255.
- Wolf, M. and Rauschenbach, H., 1963, Series resistance effects on solar cell measurement, *Advanced Energy Conversion*, 3, 455-479.