

# GÜNEŞ PİLLERİ

Elektrik Y.Müh. Ahmet Bozkurt  
Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi

## 1. GİRİŞ

İnsanoğlunun yüzyıllardır bilgi birikimi yaptığı, diğerlerine göre sınırlı olanaklar içinde teknolojik-bilimsel araştırmalar yürüttüğü bir alan "Güneş Enerjisinden yararlanma" özellikle 73-74 petrol krizinden sonra birdenbire büyük önem kazanıp birincil araştırma alanlarından biri olmuştur. Yeryüzüne ulaşan güneş enerjisinin ortalama  $800 \text{ W/M}^2$  olduğunu gözleyen uzmanlar, yeryüzüne düşen enerjinin  $1/1000$ 'i ile tüm insanlığın enerji gereksiniminin karşılanabileceğine dikkat çekmişlerdir. Bu büyük potansiyelin değerlendirilmesinin nasıl yapılabileceği, hangi yöntemin ne kadar ucuzlayıp hangi geleneksel enerji kaynağının yerini alacağı henüz belirlenmiş değildir.

Güneş pilleri, güneş enerjisinden yararlanma yöntemlerinden yalnızca birisi ve en verimli olanıdır. Güneş pilleri son yıllarda tüm dünyada önemli araştırma alanlarından birisi haline gelmiştir.

Güneş pilleri fotovoltaik aygıtlardır, bir başka deyişle ışık-gerilim dönüştürücü düzeneklerdir. Fotovoltaik olay, elektrolümünansın, yani elektriksel enerjinin ışığa çevrildiği olayın tersidir. Güneş pilleri en basit ifadeyle geniş yüzey alanlı p-n eklemlerinden oluşurlar.

## 2. FOTOVOLTAİK OLAY HAKKINDA TARİHSEL BİLGİ

Enerji dönüşümüne olanak veren birçok düzeneklerin dayandıkları ilkeler gibi fotovoltaik olay da yeni bir buluş değildir. 1839'da Edmund Becquerel, bir elektrolit içine batırılan elektrotlardan biri üzerine ışık düşürüldüğü zaman bunlar arasında bir gerilim farkı oluştuğunu bulmuştur. Olayın katılarda oluşumu, ilk kez 1877'de W.G. Adams ve R.E. Day tarafından selenyum ile yapılan denemede gözlenmiştir. Katılarla uğraşan diğer araştırmacılar arasında bakır oksit ve selenyum ile fotovoltaik pili gerçekleştiren Schotty, Lange, Grondahl önemli bir yer alırlar. Bu çalışmalar foto elektrik pozometrelerin gelişmesine yol açmıştır.

Araştırmacılar, 1954'de güç kaynağı yapımında, fotovoltaik olaydan yararlanma yoluna yöneldiler. Bu

yıllarda RCA ve Bell Telephone laboratuvarlarındaki araştırma grupları P-tipi ve N-tip yarı iletkenlerde oluşturulan P-N eklemi ile % 6 verim sağladılar. Bu ilk P-N eklemeleri kadmium sülfür ve silisyum ile sağlanmıştı. Daha sonraları silisyum P-N eklemi ile % 15, hatta son yıllarda % 21'e varan dönüşüm oranı oluşturmak sağlanmıştı.

### 3.FOTOVOLTAİKOLAY

Yeter enerjide ( $h\nu > E_g$ , burada  $h$  Planck sabiti,  $V$  radyasyonunun frekansı ve  $E_g$  yasak enerji band aralığıdır) bir ışık demeti P-N eklemi üzerine düştüğünde görülen fiziksel olay Şekil 1. de gösterilmektedir. Bir ışık demeti aynı zamanda bir foton demetidir. Atomik boyutlar küçük olduğu için bir foton, bir özgür elektron veya bir değer elektronu ya da bir boşluk ile karşılaşabilir. Bir elektronla karşılaşan bir foton ona enerjisini verir. Bir fotonun bir özgür elektronla karşılaşması ve ona enerjisini verme olasılığı zayıftır.

Bir foton bir değer elektronu ile karşılaşır ve ona yasak band gelişliği  $E_g$ 'ye eşit veya ondan daha büyük bir enerji verirse, değer bandından sökülen elektron arkasında bir boşluk bırakarak iletkenlik bandına geçer. Şekil 1. de belirtildiği gibi, bu olay eklem çentiği noktalarında oluşursa (şekil de 1 numara ile gösterilmiştir) elektrik alan elektronu N-tipi bölgeye, boşluğu da P-tipi bölgeye doğru hızlandırır. Bu yük hareketi N-tipi bölgeden P-tipi bölgeye pozitif yük geçişine denktir. Bu geçişte N-tipi bölge negatif, P-tipi bölge de pozitif olarak yüklenmektedir.

Elektron boşluk çifti N-tipi bölgede oluşursa (bu durum şekilde 2 numara ile gösterilmiştir) azınlıkta olan yük taşıyıcısı, P-tipi bölgeye geçer. Bu durumda yine, N-tipi bölgeden P-tipi bölgeye bir pozitif yük geçişi vardır.

Çoğunlukta olan yük taşıyıcılarının hareket yönünün pek önemi yoktur, genellikle bunların enerjileri gerilim duvarını aşmak için yeterli değildir. Elektron-boşluk çifti P-tipi bölgede oluşursa (şekil de 3 numara ile gösterilmiştir) elektron eklemeye doğru hareket eder ve onu aşarak N-tipi bölgeye ulaşır. Bu durumda yine N-tipi bölgeden P-tipi bölgeye bir pozitif yük geçişi vardır demektir.

Eklemden uzakta oluşan elektronlar ve boşluklar yeniden birleşirler ve böylece bir elektron-boşluk kaybolur. Bu durum şekilde 4 ve 5 numara ile gösterilmiştir.

Bir azınlık yük taşıyıcısı birçok çarpışmayla karşı karşıya kalır ve rastgele doğrultularda hareket eder ve bu durum yakalanıncaya kadar sürer. Eğer yük taşıyıcı düzensiz hareketi anında eklemeye doğru yönelmiş olursa, eklemdeki elektrik alanın içeriğinden dolayı ek-

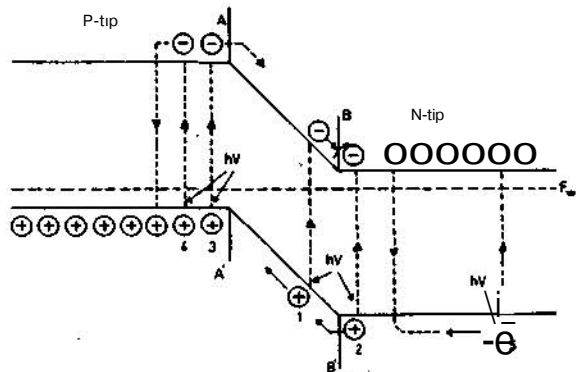
lemi aşabilir. Azınlık yük taşıyıcısı eklem etrafında bulunduğunda onun eklemi aşma olasılığı büyüktür.

Azınlık yük taşıyıcısının eklemeye olan uzaklığı, bir azınlık yük taşıyıcısının bir çoğunluk taşıyıcısı ile birleşmeden önceki ortalama yolunu gösteren bir yayılma uzaklığı ile ölçülür. N bölgesinden P bölgesine bir pozitif yük geçişine olanak veren elektron-boşluk çiftinin eklemden  $d$  uzaklıkta oluşma olasılığı  $e^{-d/L}$  ye denktir.  $L$  yayılma uzaklığı soğurulan bir fotonun eklemden geçen elektrik akımına dönüşme şansının büyük olduğu uzaklıktır.  $L$  yayılma uzaklığı yük taşıyıcılarının yoğunluğuna ve kristalin oluşma biçimine bağlı olarak  $10^{-4}$  m ve  $10^{-6}$  m arasında değişir.

Buraya kadar açıklanmasına çalışılan özelliklerden anlaşılacağı gibi fotonlar tarafından oluşturulan akımdan yararlanabilmek için, önce P-N eklemine ışık alması sağlanmalı ve sonra oluşan akım bir dış devreye yansıtılmalıdır.

Foton soğurulması ile oluşan yük taşıyıcılar çoğunlukla oldukları bölgelere doğru sürüklenirler. Bu durumda eklemden bir  $I_s$  akımı geçer. Böylece P-tipi bölge pozitif, N-tipi bölge negatif olarak yüklenir.

$I_s$  akımının geçişi P-N eklemine ileri yönde eğilimlenmesine neden olur ve bu durumda eklemdeki gerilim duvarı alçalır. Eklem bir dış bağlantısı yoksa bu ileri yöndeki eğilimlemeden dolayı ileri yönde (P ve N ye doğru) bir  $I$  akımı geçer. Bu  $I$  akımının geçişi, N-tipi bölgeyi pozitif yükleyeceğinden, çoğunluk yük taşıyıcılarının geçişine engel oluşturan gerilim duvarı yükselmeye başlar. P den N ye doğru olan bu akım, gerilim duvarı çoğunluk yük taşıyıcılarının geçişine engel oluşturacak duruma gelinceye kadar sürer. Yeniden foton soğurulması olur. Eklemde var olan elektrik alan, oluşmuş olan elektron-boşluk çiftini ayırarak bunların eklemi aşmalarını sağlar. Böylece gerilim duvarının çökmesi, sonra yükselmesi sürüp gider ve açık devre durumunda  $I_s$  akımı  $I$  akımı ile dengelenmiş olur.



Şekil 1: Fotovoltaik akım üretiminin fiziksel mekanizması

P-N eklemi dışarıdan bir  $R_L$  yük direnci ile sonlandırılırsa  $I_s$  akımının  $I_{j_0}$  kadar kısmı 'dış devreden akar, böylece P-N eklemi ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirmiş olur.  $I_s$  akımı

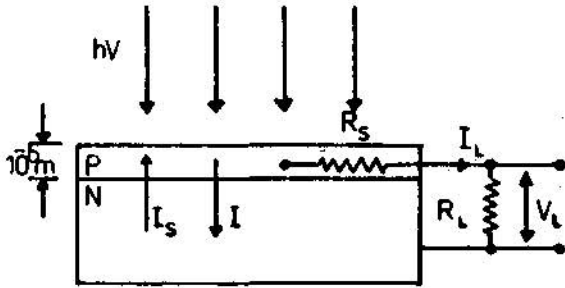
$$I_s = I + I_L \quad (1)$$

bağıntısı ile verilir.

ileri yönde akımın  $I = I_0 (e^{eV/kT} - 1)$  değeri  $I_s$  yi veren eşitlikte yerine konulursa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$I_s = I_0 (e^{eV/kT} - 1) + I_L \quad (2)$$

Renk ve sıklık bileşimleri verilen bir ışık demeti için  $I_s$  akımı ışık şiddeti ile orantılıdır.

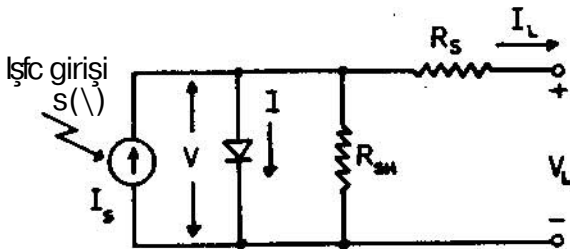


Şekil 2: Işık enerjisinin elektrik enerjisine çevrilmesi.

#### 4. FOTOVOLTAİK PİLİN (ışık pili, güneş pili) EŞDEĞER DEVRESİ.

Bir fotovoltaik pil, fotonların oluşturduğu akımın geçmesini sağlayan bir diyot'a paralel bağlı bir basit akım kaynağı gibi davranır.

$$I_s = I_0 (e^{(V_L + I_L R_s)/kT} - 1) - \frac{V_L}{R_{SH}} \quad (3)$$



Şekil 3: Güneş pili eşdeğer DC modeli.

Burada:

$A$  : 1 ve 5 arasında eğriye uygun keyfi olarak seçilecek bir değişmez.

$R_j$  : pil seri direnci

$R_{SH}$  : Paralel direnç

$I_{j_0}$  : pil çıkış akımı

$I_s$  : ışığın ürettiği akım

$I_0$  : diyod saturasyon akımı

$e$  : elektronik yük

$V_L$  : pil terminal voltajı

$k$  : Boltzman değişmezi

$T$  : Mutlak sıcaklık

Üstel işlevdeki  $V_L + I_L R_s$  ifadesi gerçekte diyod voltajı  $V$  ye eşittir. Şekil 2. ve 3. görülen  $R_s$  direnci pilin iç direncini oluşturur. Şekil 3. göre gerilim düşüşleri için aşağıdaki özdeşlikler yazılabilir.

$$V = V_L + I_L R_s \quad (4)$$

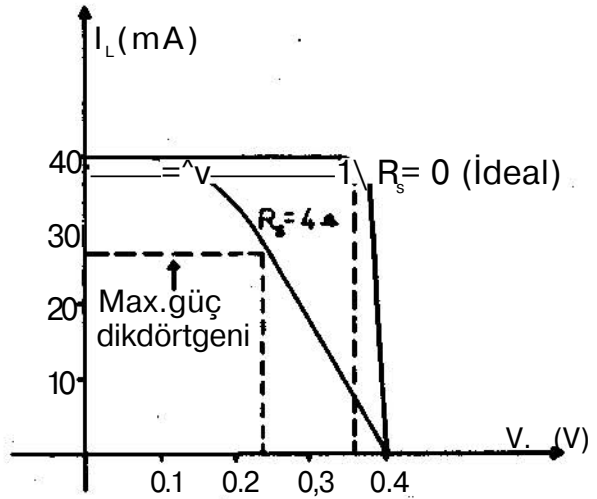
buradan

$$V_L = V - I_L R_s \quad (5)$$

verilen bir  $I_s$  için  $V_L$  yük gerilimi

$$V_L = \frac{kT}{e} \ln \left( 1 + \frac{I_s - I_L}{I_0} \right) - R_j I_L \quad (6)$$

eşitliği bulunur.  $V_L$ 'yi arttırmak için  $I_0$  akımını (eklem ters akımını) azaltmak gerekir. Düzgün olmayan eklem, arzu edilmeyen yabancı maddeler ve kristal yapıdaki boşluklar  $I_0$  akımının artmasına neden olurlar.



Şekil 4: Güneş Pili I - V öz eğrisi.

Yükten geçen akım aynı zamanda  $R_j$  direncinden geçtiği için verilen  $I_L$  akımı için pilin içinde bir gerilim düşmesi olacağından yük direnci uçları arasındaki gerilim farkı azalır.

Şekil 4. den görüleceği gibi kuramsal olarak çizilen eğri ( $R_j = 0$ ) ile uygulama sonuçlarına göre çizilen eğri ( $R_j = 4$ ) arasında büyük bir uyum vardır.

Yüke sağlanan güç VL ve IL ile sınırlanan dikdörtgen ile verilmektedir. İç direnç çıkış gücünün azalmasına neden olur.

(6) bağıntısında görülen  $I_s$  akımı ışık yeğirliği ile orantılı olduğundan, aynı dalga boyunda fakat farklı yeğirlikteki ışık demetleri için IL nin dolayısıyla VL nin aynı olamayacağı açıktır.

Açık devre durumunda  $IL = 0$  dir.

$$I_L = I_s - I_0 (e^{eV/kT} - 1) \text{ bağıntısı}$$

's' = 'o' ( $e^{eV/kT} - 1$ ) biçimine girer ve buradan açık devre gerilimi için

$$V_0 = V_T \ln (I_s/I_0 - 1) \quad (7)$$

eşitliği bulunur. ( $V_j = \frac{kT}{e}$  ısı gücü)

Eğer T değişmez kalır ise  $V_0$  ışık yeğirliği ile orantılı olmak üzere  $I_s$  ve  $I_0$ 'ın işlevi olarak değişir.

## 5. GÜNEŞ PİLLİNİN VERİMİ

Verilen bir V için yük direncinden geçen akım

$$I_L = I_s - I_0 = I_s - I_0 (e^{eV/kT} - 1) \quad (8)$$

çıkış gücü

$$P = I_L V = (I_s - I_0 (e^{eV/kT} - 1)) V \quad (9)$$

Bu eşitliğin V'ye göre türevi alınır ve sonra sıfıra eşitlenirse gücü maksimum yapan gerilimi veren bağıntı saptanır.

Maksimum güce karşılık olan akım;

$$I_{max} = I_s - I_0 (e^{eV_{max}/kT} - 1) \quad (10)$$

$$I = I_0 (e^{eV/kT} - 1) \quad (11)$$

$$I_{max} = \frac{(eV_{max}/kT) \cdot I_0}{1 + eV_{max}/kT} \quad (12)$$

(11) eşitliği göz önüne alınarak  $I_{max}$  için aşağıdaki bağıntı bulunur.

Maksimum güç

$$P_{max} = I_{max} V_{max} = \frac{eV_{max}/kT}{1 + eV_{max}/kT} \cdot I_0 \left( 1 + \frac{eV_{max}/kT}{I_s} \right) \quad (13)$$

Genellikle  $I_0$ ,  $I_s$  den beş ya da daha fazla küçük olduğundan

$$P_{max} = \frac{(eV_{max}/kT) I_s V_{max}}{1 + eV_{max}/kT} \quad (14)$$

alınabilir.

Gelen ışınların getirdiği maksimum güç, fotonların Nph sayısı ile bir fotonun ortalama Eph enerjisinin çarpımına eşittir. Bunu dikkate alarak maksimum verim için:

$$n_m = \frac{(eV_{max}/kT) V_{max} I_s}{(1 + eV_{max}/kT) Nph Eph} \quad (15)$$

bağıntısı bulunur.

Değer bandındaki bir elektronun özgür duruma gelebilmesi için gerekli olan  $E_g$  enerjisi büyük olduğu oranda,  $E_g$  den büyük enerjin fotonların sayısı azalır,  $I_s/I_0$  oranı, dolayısı ile  $V_{max}$  büyür, bu durum  $n_m$ ,  $E_g$  nin işlevi olarak değişir. (15) bağıntısı basitleştirilebilir. Bunun için kısa devre akımı  $I_s = K n_{ph}$  biçiminde yazılır, burada K yansıma, geçirgenlik ve çarpışmadan ileri gelen kayıpları içine alan bir değişmezdir. Eğer K yaklaşık olarak 1 veya  $eV_{max}/kT$  birden çok büyük kabul edilirse,

$$n_m = \frac{nph V_{max}}{Nph Eph} \quad (16)$$

biçiminde yazılabilir. Bu bağıntı silisyum için uygulanırsa: nph birim yüzeye birim zamanda gelen ve bir elektron-boşluk çifti oluşturabilecek yeterli enerjiye sahip foton sayısı silisyum için 2/3 Nph, ve maksimum güç geriliminin fotonların getirdiği enerjinin 1/3 kadarı olduğu dikkate alınırsa, verim için bulunan kuramsal değer % 22 olur.

## 6. PİLLERİN YAPIMI İÇİN UYGUN MADDELERİN SEÇİMİ

Fotovoltaik dönüştürücülerin yapımında kullanılan maddelerin seçiminde göz önünde tutulması gereken bazı özellikler vardır.

Fotovoltaik dönüştürücülerde kullanılan yarı iletkenlerde iki olay oluşur. Birincisi, yasak band genişliğinden daha büyük enerjili fotonların soğurulmuş olanların  $n_{ph}$  sayısının yasak band genişliği arttıkça azalmasıdır. Yasak band aralığı artarken doyum akımı  $I_0$  azalır, bu durum çıkış geriliminde artışa neden olur. Yasak band aralığının artmasının  $I_0$  doyum akımının azalmasına neden oluşu  $I_s/I_0$  oranının logaritmasından dolayı açık devre geriliminin büyümesine yol açar. Bu iki özelliğin verimin maksimum değeri üzerindeki etkisi Şekil 5. de görüldüğü gibidir.

Bu çizimde güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde maksimum verim yasak bant aralığının işlevi olarak verilmektedir. Çeşitli maddeler için

