

GÜNEŞ ENERJİSİNDEN FOTOVOLTAİK YÖNTEMLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GÜÇ DÖNÜŞÜM VERİMİ VE ETKİLİ ETMENLER

H. Hüseyin ÖZTÜRK

Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi
Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, 01330 Sarıçam/Adana,

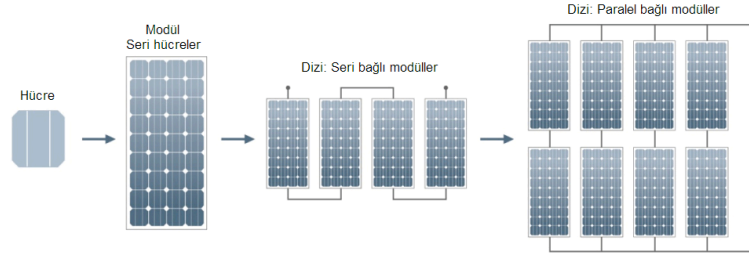
hhozturk@cu.edu.tr

ÖZET

Fotovoltaik (PV) teknoloji, pahalı ve yenilenebilir bir teknoloji olmakla birlikte, tasarım ve kurulum açısından en basit elektrik üretim teknolojidir. PV hücreler, yarı iletken maddeler olup, güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürürler. Herhangi bir güneş PV sistemi için enerji dönüşüm faktörü, verim olarak tanımlanmaktadır. Bu durum, bazı yanlışlıklara neden olmaktadır. Bir PV hücrenin verimi, üretilen elektriğin toplam güneş ışınımına oranı olarak dikkate alınabilir. Bu tanımlamaya göre, sadece PV hücrenin ürettiği elektrik dikkate alınmaktadır. Ortam sıcaklığı, hücre sıcaklığı ve PV hücrenin kimyasal bileşenleri gibi PV hücrelerin diğer bileşenleri ve özellikleri dikkate alınmamaktadır. PV hücreler kullanımları sırasında ısınmakta ve buldukları ortamın sıcaklığına göre ısı kaybetmekte veya kazanmaktadır. Diğer bir deyişle, PV hücrenin ısınması sonucunda açığa çıkan ısı enerjisinin de, PV hücrenin toplama veriminde dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada; güneşten gelen foton akımından akımı üretilmesi, akım-gerilim-güç özellikleri, dolum faktörü, en yüksek güç noktası, PV hücre verimi, enerji dönüşüm verimini etkileyen etmenler, Termodinamik verim sınırı, en yüksek verim, kuantum verimi ve PV hücre verimine etki eden etmenler incelenmiştir.

1. GİRİŞ

Fotovoltaik (PV) hücreler (Şekil 1), güneş ışınlarını doğrudan elektriğe dönüştürebilen, hareketli mekanik parçaları olmayan, bakımı kolay ve ömürleri uzun olan elektronik sistemlerdir. PV hücreler, yarı iletken maddeler olup, güneş enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürürler (Şekil 1). Yarı iletken bir diyot olarak çalışan PV hücre, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik dönüştürür. Güneş enerjisi, PV hücrenin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 20 arasında bir verimle elektriğe dönüştürülebilir. PV hücrelerin yüzeyleri genellikle kare, dikdörtgen ve daire biçimindedir. PV hücrelerin alanları da, 60–160 cm² arasında değişmekte olup, ortalama 100 cm²'dir. Kalınlıkları ise 0,2–0,4 mm arasındadır. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda PV hücre birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya PV modül adı verilir (Şekil 1). Güç talebine bağlı olarak PV modüller birbirlerine seri veya paralel olarak bağlanarak birkaç Watt'tan megaWatt'lara kadar PV diziler oluşturulur (Şekil 1).



Şekil 1. PV hücre, modül ve dizi tasarımları

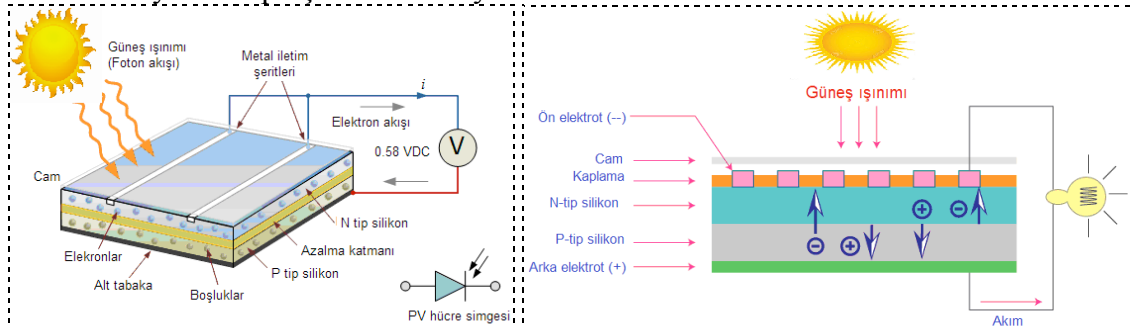
2. FOTOVOLTAİK HÜCRELERİN YAPISI VE ÇALIŞMA İLKESİ

PV hücreler PV etkiye bağlı olarak çalışırlar. *Fotovoltaik etki*, fotovoltaik bir hücre tarafından güneş ışımının elektriğe dönüştürüldüğü temel bir fiziksel işlemdir (Şekil 2). Güneş ışımındaki fotonların, silikon gibi yarı iletken malzemelerin yüzeyine çarparak, atomlardan elektronları serbest bırakmaları ile ortaya çıkar. *Fotovoltaik* Yunanca, ışık anlamına gelen *photo* ve elektrik akımını geliştiren makineyi tasarlayan *Alessandra Volt*'dan esinlenerek gerilim anlamına gelen *voltaic* kelimelerinin birleşmesinden oluşur. Güneş hücreleri (fotovoltaik hücreler), ilk kez 1839 yılında *Becquerel* tarafından araştırılmıştır [1-2].

Einstein ışığın sadece dalga yapısında olmadığını tanecik ya da parçacık olarak da hareket ettiğini göstermiştir. Işık bu karakteristiği içindeki foton adı verilen enerji paketçikleri sayesinde yapar. Diğer bir deyişle güneş ışımını elektromanyetik parçacıkların yani

fotonların bir akışı olarak da görülebilir. Fotonlar elektromanyetik radyasyonun parçacık temsilidir. Elektromanyetik radyasyon enerjisini foton adı verilen bu parçacıklar aracılığıyla iletir. Elektromanyetik radyasyon enerjisini fotonlar taşır ve iletir. Fotonlar, oldukça enerjik parçacıklar olup, fotosentez sürecinde olduğu gibi, foto reaksiyonları tetikleyebilirler. Veya yarıiletkenlerdeki elektronların iletkenliğini tetikleyerek güneş ışığının elektriğe dönüşmesini sağlayabilirler.

Güneşten gelen ışınım, enerji taşıyan fotonların birleşiminden oluşur. Bu fotonlar, güneş ışınım spektrumundaki farklı dalga boylarına bağlı olarak, farklı miktarlarda enerji içerirler. Fotonlar, fotovoltaik bir hücre üzerine geldiğinde; bir kısmı hücre tarafından soğurulur, bir kısmı yansıtılır, kalan kısmı da hücre içerisinden geçer. Fotovoltaik hücre tarafından soğurulan fotonlar elektrik üretir. Fotonun enerjisi, yarı iletken bir malzemenin atomundaki elektrona transfer edilir.



Şekil 2. a) PV hücrenin çalışma ilkesi

b) PV hücrenin yapısı

Şekil 2.b’de kesit alanı gösterilen PV hücreden elektriksel güç elde edilebilmesi için, güneşten gelen fotonların fotovoltaiik malzeme tarafından soğurularak foto akımın ve gerilimin üretilmesi gerekmektedir. Güneşten gelen ışınım, enerji taşıyan fotonlardan meydana gelir. Fotonlar silikon gibi yarı iletken malzemelerin yüzeyine çarparak, atomlardan elektronları serbest bırakırlar. Fotovoltaiik hücre üzerine gelen fotonların bir kısmı hücre tarafından soğurulur, bir kısmı yansıtılır, kalan kısım ise hücre içinden geçer. Fotovoltaiik hücre tarafından soğurulan fotonlardan elektrik üretilir. Fotonun enerjisi, yarı iletken malzemenin atomundaki elektrona transfer olur. Elektron, yeni kazandığı bu enerji sayesinde bir elektrik devresindeki akımın parçası olabilmek için, yarı iletken malzemedeki bir tek atoma ilişkin normal pozisyonundan kurtulabilme yeteneği kazanır (Şekil 2b).

Fotovoltaiik (PV) hücrelerin çalışma ilkesi fotovoltaiik (PV) ilkeye dayanır. Üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. PV hücrenin verdiği elektriğin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. PV ilkeye göre çalışma gerçekleşebilmesi için, güneş ışığını soğuracak malzeme, yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile uyumlu ve elektrik yüklerinin bir birinden ayrılabilmesine izin verebilecek özellikte bir yarıiletken (Si, GaAs, CdTe gibi) olmalıdır. Basitçe bir PV hücre, yarıiletkende n-tipi ve p-tipi bölgeler oluşturularak tasarımılanabilir. Oluşturulan bu n-tipi ve p-tipi bölgelerin geçiş bölgesindeki p-n

eklemi kesiminde, doğal olarak bir elektrik alanı kurulur. Yarıiletken malzemenin PV hücre olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaiik ilkenin gerçekleşmesi gerekir.

Yarı iletken eklem PV hücre olarak çalışması için, eklem bölgesinde fotovoltaiik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada gerçekleşir:

1. Eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-boşluk çiftleri oluşturulur.
2. Bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılırlar.

Yapıları basitçe bir p-n eklemde oluşan diyotlara benzer. Fotoelektrik ilkeye dayanarak hücreden fotonlar tarafından koparılan elektronlar eklemde harekete geçer ve bir elektrik akımı oluşturur.

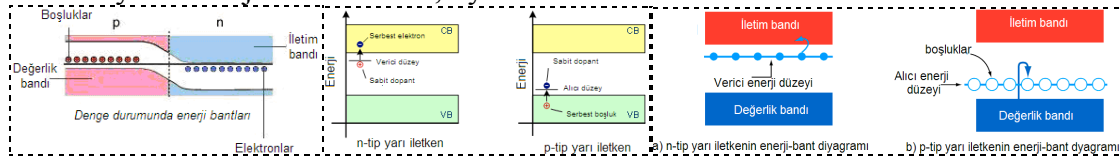
Böylece, birbirlerinden ayrılan elektron-boşluk çiftleri, PV hücrenin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. PV hücrelerin yüzeyine güneş ışığı düştüğünde bu elektrik alanı momentum (kuvvet) sağlar ve ışıkla uyarılmış elektronlar oluşur. PV ilkenin gerçekleşme sürecinde, p-n eklem diyodun p ve n bölgelerine gelen fotonlar soğurulduğunda; enerjisi yasak band aralığından daha yüksek olan fotonlar, değerlik bandındaki elektronları iletkenlik bandına çıkararak elektron-boşluk çiftleri (Şekil 3) oluştururlar. Elektron-boşluk çiftleri birbirinden ayrılarak, dış yük üzerinden bir foto akım akar. Böylece, yüksek enerjili elektronlar enerjisini dış yüke aktararak tekrar PV hücreye dönerler.



Şekil 3. Elektron-boşluk çifti oluşması

Yarı iletkenler, bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bantlar *değerlik bandı* ve *iletkenlik bandı* adını alırlar (Şekil 4 ve 5). Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarı

iletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini değerlik banttaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron-boşluk çifti oluşur (Şekil 4).



Şekil 4. n-tip ve p-tip yarı iletkenlerin enerji-bant diyagramları

Bu olay, p-n eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron-boşluk çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde PV hücre, elektronları n bölgesine, boşlukları da p bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-boşluk çiftleri, PV hücrenin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun hücre yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarı iletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-boşluk çiftleri oluşturulur. Fakat gerekli elektrik alan olmadığından birleşerek kaybolurlar.

3. FOTON AKIMINDAN ELEKTRİK AKIMI ÜRETİLMESİ

n tipi veya p tipi bir malzeme üzerine güneş ışığı düştüğünde, yasak bant aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar, eşit sayıda elektron ve boşluk çifti oluştururlar ($\Delta n = \Delta p$). Işık yoğunluğu yüksek olduğunda bile, yarı iletken içerisindeki çoğunluk taşıyıcı konsantrasyonunda önemli bir değişiklik meydana gelmezken, azınlık

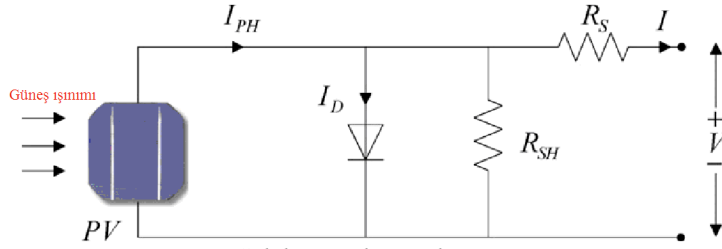
taşıyıcı konsantrasyonunda oldukça büyük bir artış görülmektedir [3].

p-n eklem diyotun eklem bölgesindeki elektrik alan nedeniyle, p-tipi yarıiletkende üzerine ışık düşmesi sonucu iletkenlik bandına çıkarılmış ve eklem bölgesi sınırına ulaşmış azınlık taşıyıcıları elektronlar, hızla n-tipi bölgeye çekilirler. Aynı yaklaşımla, n-tipi bölgede elektronların iletkenlik bandına geçmesi ile değerlik bandında kalan azınlık taşıyıcıları boşluklar eklem bölgesinin kıyısına ulaştıklarında p-tipi bölgeye geçerler. Özet olarak, eklem bölgesi kıyısına ulaşmış azınlık taşıyıcıları, çoğunluk taşıyıcısı olarak tanımlandıkları bölgeye geçerler. Bunun sonucu olarak fotonların diyot üzerine düşmesi sonucu üretilen elektronlar, diyotun bir tarafına; boşluklar da diğer tarafa itilirler.

Bu şekilde birbirlerinden ayrılmış elektronlar ve boşluklar, Şekil 5'deki gibi bir dış devre üzerinden birleştirildiğinde, dış devre elemanlarından akan elektriksel yükler,

doğrudan güneş enerjisinden elde edilen foto akımın kaynağıdır. Hücre bir

devreye bağlandığında elektrik akımı meydana gelir (Şekil 5).



Şekil 5. PV hücre devresi

4. AKIM - GERİLİM - GÜÇ ÖZELLİKLERİ

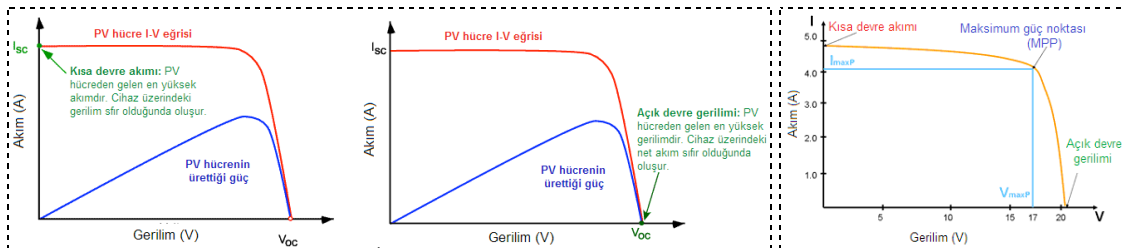
PV hücreye ait akım-gerilim (I-V) özellikleri üç ayrı yöntemle belirlenebilir:

1. Sabit bir ışık şiddeti altında, değişken bir direncin açık devre ve kısa devre durumları arasında değiştirilerek, PV hücrenin uçları arasındaki gerilime karşı dirençten geçen akım ölçülür.
2. PV hücre karanlıkta, bir dış DC besleme kaynak yardımı ile diyot gibi çalıştırılarak
3. Şiddeti değiştirilebilen bir ışık kaynağının

aydınlatılması altında V_{oc} ve I_{sc} değerleri ölçülerek

Açık devre gerilimi (V_{oc}): Bir PV hücrenin *açık devre gerilimi* (V_{oc}), hücreden geçen akımın sıfır olması durumunda hücre uçlarından ölçülen gerilimdir (Şekil 6). Açık devre gerilimi (V_{oc}), hücreden geçen akımın sıfır olması durumunda, hücre uçlarında görülen gerilimdir [4].

Kısa devre akımı (I_{sc}): PV hücrenin *kısa devre akımı* (I_{sc}) ise, sıfır gerilimde ve aydınlatma altında hücreden geçen akımdır (Şekil 6). Paralel direnç etkilerinin ihmal edildiği ideal durumda ışıkla oluşan akıma eşit olup, ışınım şiddetine bağlıdır.

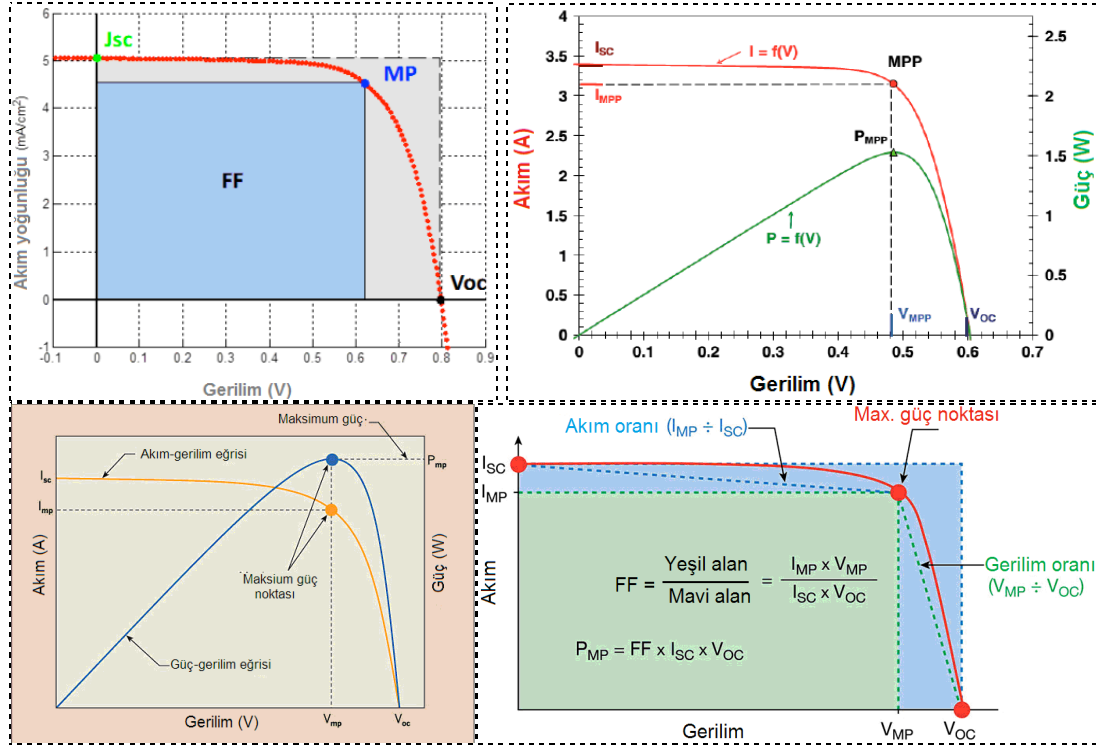


Şekil 6. Bir PV hücrenin akım-gerilim eğrisi

Dolgu Faktörü (FF): Bir PV hücrenin maksimum çıkış gücünü, açık devre gerilimi ve kısa devre akımına bağlı olarak tanımlamak için kullanılan bir değişkendir (Şekil 7). Seri direnç arttıkça, FF değeri azalır [6]. Dolgu faktörü (FF), maksimum güç değerinin

(P_m) açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) çarpımına bölünmesiyle belirlenir.

$$FF = \frac{P_m}{V_{ad} \times I_{kd}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{\eta \times I_s \times A_c}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad [1]$$



Şekil 7. PV hücrenin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) özellikleri

Dolgu faktörünün değeri, PV hücrenin ideallığının bir ölçüsüdür. İdeal bir PV hücrede, $FF= 1$ 'dir. Bu nedenle, herhangi bir PV hücrede dolgu faktörünün 1'e yakın olması istenir (Çizelge 1). Dolgu faktörünün büyük olması için seri direncin (R_s), diyotun ideal olma faktörünün (A_o), ters doyum akım yoğunluğunun (J_o) ve sıcaklığın (T) küçük; yasak enerji aralığının (E_g) ve şönt direncin (R_{sh}) büyük olması gerekir [5]. Dolgu faktörü, hücrelerin

seri ve şönt direnç değerlerinden ve diyot kayıplarından doğrudan etkilenir. Şönt direnç (R_{sh}) artırılarak ve seri direnç (R_s) azaltılarak, dolgu faktörü yükseltilebilir. Bu durumda, hücre çıkış gücü teorik olarak en yüksek değere getirilerek daha yüksek verim sağlanır. Dolgu faktörü, normal silikon bir PV hücresi için yaklaşık olarak % 80 değerindedir. Dolgu faktörü (FF), bir PV hücrenin genel davranışındaki bir diğer belirleyen bir değişkendir.

Çizelge 1. Değişik Tip PV Hücrelerin Karakteristik Değerleri [7]

PV Hücre	Alan (cm ²)	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
Tek kristal Si	4.0	0.706	42.2	82.8	24.7
Tek kristal GaAs	3.9	1.022	28.2	87.1	25.1
Çok kristal Si	1.1	0.654	38.1	79.5	19.8
Amorf Si	1.0	0.887	19.	74.1	12.7
CuInGaSe ₂	1.0	0.669	35.7	77.0	18.4
CdTe	1.1	0.848	25.9	74.5	16.4

Maksimum Güç Noktası: Bir PV hücre, geniş bir gerilim (V) ve akım (I) aralığında çalışabilir. *Maksimum güç noktası*, sürekli olarak ışınım alan bir PV hücredeki direnç yükünü sıfırdan

(kısa devre) çok yüksek bir değere (açık devreye) kadar sürekli arttırarak belirlenebilir. Maksimum güç noktasında $V \times I$ değeri yüksektir. Bu noktada, PV hücre bulunduğu ışınım

seviyesinde en yüksek elektrik üretir. Çıkış gücü, hem kısa devre hem de açık devre sınır değerlerinin her ikisinde de sıfırdır. PV hücrenin üretebileceği en yüksek çıkış gücü, Şekil 7'de görüldüğü gibi, hücrenin I-V eğrisi içine çizilebilecek maksimum alanlı dikdörtgenin alanına eşittir.

Yüksek kaliteli tek kristal silikon bir PV hücre, 25 ° C hücre sıcaklığında 0.60 V açık devre gerilim (V_{oc}) üretebilir. Güneşlenme koşullarının iyi ve hava sıcaklığının 25 °C olması durumunda, hücre sıcaklığı büyük bir olasılıkla 45 °C'ye yakın olacak ve açık devre gerilimi hücre başına 0.55 V değerine düşürecektir. Bu tür bir PV hücreyle, gerilim değeri, kısa devre akımına (I_{sc}) yaklaşıncaya kadar kabul edilebilir bir düzeyde düşer. Hücre sıcaklığının 45 °C olması durumunda, maksimum güç değeri, tipik olarak açık devre geriliminin % 75-80'i (bu durumda 0.43 V) ve kısa devre akımının % 90'ı ile üretilir. Bu değer, $V_{oc} \times I_{sc}$ çarpımının % 70'ine kadar ulaşabilir. Bir PV hücreden gelen kısa devre akımı (I_{sc}) aydınlanma ile yaklaşık olarak orantılı olmasına karşın, açık devre gerilimi (V_{oc}) aydınlatmanın % 80 düzeyinde azalması durumunda sadece % 10 düzeyinde azalabilir. Düşük kaliteli PV hücrelerde, gerilim değeri artan akımla birlikte daha hızlı bir şekilde azalır. PV hücrelerin gücü sadece $V_{oc} \times I_{sc}$ çarpımı olarak değil, yük eğrileri ile birlikte verilmelidir. Bir PV hücrenin maksimum güç noktası gelen ışınımına bağlı olarak değişir. Örneğin, PV modüller üzerinde toz birikmesi, maksimum güç değerini azaltır.

5. VERİM

PV hücre ve modül verimleri birbirinden farklı anlamlar taşır. Bireysel bir PV hücrenin verimi, PV

modül veriminden daha yüksektir (Çizelge 2). Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 20 arasında bir verimle elektriğe dönüştürülebilir. Verimi % 10'un altında olan güneş hücreleri, uygulamada verimli ve ekonomik değildir. Yarı iletken güneş hücrelerinin verimi; laboratuvar koşullarında % 10-30, uygulamada ise % 5-20 arasında değişir. Uygulama koşullarında verimi % 15 olan güneş hücresi iyi olarak değerlendirilir.

Herhangi bir PV sistemin verimini etkileyen etmenler şunlardır: PV hücrenin malzemesi, PV hücrenin akım-gerilim özellikleri, dolun (şarj) kontrol cihazının özellikleri, dönüştürücü verimi, akümülatör verimi, sıcaklık, PV tesisatın gölgelenme durumu, kullanılan kablunun kalınlığı, PV tesisat üzerinde toz/kir birikmesi, PV tesisatın yönlendirilmesi, PV dizilerin eğim açısı, PV hücrelerin yüzeyine uygulanan işlemler ve PV tesisata uygulanan bakım/onarım işlemleridir.

Hücre veriminin yüksek olduğu modüllerin birim alan başına verebildikleri güç değerleri fazla olduğundan, bu tip hücrelerin yüzey alanı küçük tesisatlar için kullanılmaları uygundur. Hücre verimlilikleri ile modül verimlilikleri farklıdır. Örneğin, tek kristal silikon bir hücrenin verimi % 24 iken, aynı hücrelerden oluşan modülün verimi %13-17 olabilmektedir. Çok kristal silikon hücrenin verimi %18 iken, modül verimi %11-15 arasındadır. Amorf silikon hücrenin verimi %11-12 iken modül verimi % 5-8 civarındadır. Bunun nedeni, modül verimi hesabının tüm panel yüzeyinin dikkate alınarak yapılmasından kaynaklanmaktadır. Düzlem panel yüzeyinde PV hücre dizileri arasında kullanılmayan

elektriksel olarak yararsız yüzeyler de mevcuttur. Bu yüzeyler, verimi hesaplamasında verimi azaltan etkide bulunurlar. Fotovoltaik sistemin toplam

maliyetinin % 55–60'ını modül maliyetleri oluşturmaktadır.

Çizelge 2. Değişik Tip PV Hücre ve Modül Verimlerinin Karşılaştırılması [7]

PV Teknoloji		Hücre Verimi (%)	Modül Verimi (%)
Kristal silikon	Tek kristal silikon	25,0	14–16
	Çok kristal silikon	21,3	14–16
	Galyum arsenit	27,5–29,1	
İnce film	Amorf silikon	13,6	6–9
	Kadmiyum tellür	22,1	9–12
	CIS/CIGS	22,3	8–14

PV Hücre Verimi: Geleneksel p-n eklem PV hücrelerde verim kaybına sebep olan iki önemli etken; enerjisi yasak bant aralığından düşük olan fotonların soğurulamaması ve yüksek enerjili fotonların fazlalık enerjilerinin ısıya dönüşmesidir. Bu iki kayıp mekanizması, fotovoltaik çevrimde güneş enerjisinin yaklaşık yarısının kullanılmadığı anlamına gelmektedir. Son nesil güneş pilleri; bu kullanılmayan enerjiden yararlanarak, verimi artırmayı hedeflemektedir [7].

PV hücre verimi, güneş enerjisinin fotovoltaik (PV) etkiyle elektrige dönüştürülebilen bölümünü belirtir. Enlem ve iklimle birlikte PV sistemde kullanılan PV hücrelerin verimi, sistemin yıllık elektrik çıktısını belirler. Örneğin, verimi % 20 ve yüze alanı 1 m² olan bir PV modül, Standart Test Koşulları'nda 200 W elektriksel güç üretecektir. Ancak, PV modül gökyüzünde güneş ışınımı fazla olduğunda daha fazla, güneş ışınımının düşük ve gökyüzünün bulutlu olduğu koşullarda ise daha az elektriksel güç üretecektir. Yıllık 5.5 kWh/m²/gün'lük güneş enerjisi alan bir bölgede, bu özelliklere sahip bir PV modülün yılda 440 kWh elektrik üretmesi beklenebilir. Bununla birlikte, yılda sadece 3.8 kWh/m²/gün güneş ışınımı alan başka bir bölgede, yıllık verim aynı modül

için 280 kWh değerine düşecektir. Kuzey enlemlerde verim, önemli ölçüde daha düşük olacaktır.

Bir PV hücrenin enerji dönüşüm etkinliğini; yansıtma özellikleri, termodinamik verimlilik, yük taşıyıcı ayırma etkinliği ve iletim etkinliği değerleri gibi çeşitli faktörler etkiler. Verimi etkileyen bu değişkenlerin doğrudan ölçülmesi zor olabileceğinden, bunun yerine *kuantum verimi*, V_{oc} değeri ve FF gibi diğer değişkenler ölçülür. Yansıma kayıpları, dış kuantum verimini etkilediğinden, kuantum verimi değerine bağlı olarak hesaplanır. Toplam kayıp, kuantum verimi, V_{oc} değeri ve dolun faktörü değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Direnç kayıpları, çoğunlukla dolun faktörü değerine bağlı olarak hesaplanır. Direnç kayıpları, kuantum verimi ve V_{oc} değerlerini de etkiler.

Enerji Dönüşüm Verimini Etkileyen Etmenler: Enerji dönüşüm verimini etkileyen etmenler, 1961 yılında *William Shockley* ve *Hans Queisser* tarafından yapılan bir araştırmada belirlenmiştir. Fizikte, *Shockley-Queisser* sınırı veya ayrıntılı denge sınırı veya *Shockley Queisser* Etkinlik Limiti veya *SQ Limiti*, PV hücreden güç toplamak için tek bir p-n eklemde oluşan bir PV hücrenin *en yüksek teorik*

verimini belirtir. İlk önce *William Shockley* ve *Hans-Joachim Queisser* tarafından 1961 yılında hesaplanmıştır. *Shockley-Queisser* sınırı, gelen güneş ışınımının her fotonu başına üretilen elektrik miktarına bağlı olarak hesaplanır. Sınır, güneş enerjisinden PV ilkeye bağlı olarak elektrik üretiminde en temel değerlerden biridir ve bu alandaki en önemli katkılardan biri olarak kabul edilmektedir.

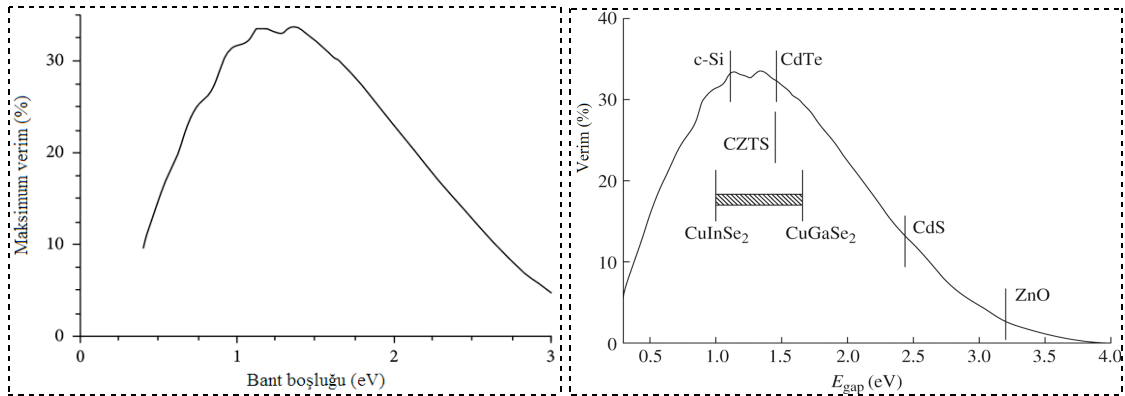
Sınır, 1.34 eV bant aralığına sahip tek bir p-n eklem, AM=1.5 güneş spektrumu koşullarında, güneş enerjisinin elektriğe dönüşümünde en yüksek verimin yaklaşık % 33.7 olduğunu belirtir. Diğer bir deyişle, ideal bir PV hücre üzerine 1000 W/m² güneş ışınımı geldiğinde, bu PV hücre üzerine düşen ışınımın sadece % 33.7'sini (337 W/m²) elektriğe dönüştürebilir. PV hücre malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan silikon, 1.1 eV bant aralığına sahiptir ve en yüksek verimi yaklaşık % 32 düzeyindedir. Modern ticari tek kristal PV hücrelerin, enerji dönüştürme verimi yaklaşık % 24 düzeyindedir. Enerji dönüşümündeki kayıplar, ön yüzeyde yansımalar ve yüzeyindeki ince tellerde ışık tıkanması gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. *Shockley* ve *Queisser* sınırı, en temel fiziksel sınır olarak kabul edilir. Bununla birlikte,

teorik gücü daha da düşürecek başka etmenler de vardır. *Shockley* ve *Queisser* sınırı aşağıdaki varsayımlara dayanır

1. Gelen foton başına uyarılan bir elektron-boşluk çifti
2. Bant aralığının üzerinde olan elektron-boşluk çifti enerjisinin ısı gevşemesi
3. Yoğunlaştırılmamış güneş ışınımı ile aydınlatma

Bu varsayımların hiçbiri mutlaka doğru değildir ve temel sınırı önemli ölçüde aşmak için farklı yaklaşımlar yapılmıştır. *Shockley-Queisser* sınırı sadece tek bir p-n ekleme sahip PV hücreler için geçerlidir. Çok katmanlı hücreler bu sınırın üstünde verim gösterebilir. En yüksek sınır değer, güneş ışınımının yoğunlaştırdığı koşullarda sonsuz sayıda katmana sahip PV tasarımı ile % 86.8 olarak belirlenmiştir.

Termodinamik verim sınırı ve sonsuz yığın sınırı, yoğunlaştırılmamış güneş ışınımı koşullarında, tek eklemlili bir PV hücre verimi için *Shockley-Queisser* sınırınıdır. Çizilen bu eğri, gerçek güneş spektrumu verilerini kullanarak belirlendiğinden, atmosferdeki IR soğurma bantlarından etkilenir (Şekil 8). % 34 düzeyinde olan *Shockley-Queisser* sınırı çok iletkenli güneş pilleri ile aşılabılır.



Şekil 8. Değişik PV hücreler için verim sınırları [2]

T_c sıcaklığında bir sıcak kaynak ve T_s sıcaklığında bir soğuk kaynak varsa, mümkün olabilen en yüksek teorik iş (veya elektrik gücü), $1-T_c/T_s$ ile tanımlanır. Bu değerdeki iş *Carnot* ısı motoru tarafından yapılır. Bu şekilde tanımlanan değer, PV sistemin yapabileceği en yüksek teorik iş (veya üretebileceği en yüksek elektrik miktarı) veya ekserji olarak tanımlanır. Güneş sıcaklığı için 6000 K, yeryüzündeki ortam koşullarında hava sıcaklığı 300 K olarak alınır, bu değer % 95'e karşılık gelir.

Alexis de Vos ve Herman Pauwels [8], 1981 yılında, bant boşlukları sonsuzdan (gelen fotonların karşılaştığı ilk hücreler) sıfırdan kadar değişen sonsuz sayıda hücre yığını ve açık devre gerilimine çok yakın hücre gerilimi ile hücre bant aralığının % 95'ine eşit ve her yönden gelen 6000 K siyah cisim ışınımı ile ulaşılabilir olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, sağlanan % 95 verim, elektrik gücünün soğurulan ışınımın net miktarının % 95'i olduğu anlamına gelir. Hücre yığını, yaklaşık 6000 K'de olduğu haliyle ışınım yayar. Transfer edilen ısı miktarı ve verim hesaplanırken, bu ışınım gelen ışınımdan çıkartılmalıdır. Ayrıca, tüm yönlerden 6000 K sıcaklıktaki siyah cisim ışınımı ile aydınlatılan bir yığının güç çıkışını en yüksek düzeye çıkarmanın daha önemli olduğu düşünülmüştür. Bu durumda, gerilim değerleri bant aralığının % 95'inden daha düşük bir seviyeye düşürülmesi gerekir. Buradaki yüzde değer, tüm hücrelerde sabit değildir. En yüksek güç değerinin gelen ışınım miktarının % 86,8'ine karşılık geldiği belirlenmiştir. Gelen ışınım sadece gökyüzünde güneşin büyüklüğünde bir alana geldiğinde, verim sınırı % 68,7 değerine azalır.

En Yüksek Verim: Normal fotovoltaiik sistemler sadece bir adet p-n ekleme sahiptir. Bu nedenle, bu tip PV sistemler için *Shockley ve Queisser* tarafından en son ve en yüksek verim olarak adlandırılan daha düşük bir verim sınırı geçerlidir. Soğurucu malzemenin bant aralığının altında bir enerjiye sahip olan fotonlar, bir elektron-boşluk çifti oluşturamazlar. Bu nedenle, bu fotonların enerjileri yararlı bir çıktıya dönüştürülmez. Bu özellikteki fotonlar soğurulursa, sadece ısı enerjisi üretilir. Bant aralığı enerjisinin üzerinde bir enerjiye sahip olan fotonlar için, bant aralığının üzerindeki enerjinin sadece bir kısmı yararlı bir çıktıya dönüştürülebilir. Daha fazla enerjiye sahip bir foton soğurulduğunda, bant aralığının üzerindeki fazla enerji, taşıyıcı kombinasyonunun kinetik enerjisine dönüştürülür. Taşıyıcıların kinetik enerjisi denge hızını azalttığından, fazla kinetik enerji ısı enerjisine dönüştürülür. Geleneksel tek eklemlili hücrelerinin en yüksek teorik verimli % 33.16'dur. Çoklu bant aralığına sahip soğurucu materyalleri olan PV hücrelerin termodinamik verim sınırı arttırılabilir.

Kuantum Verimi: Yukarıda belirtildiği gibi, bir foton bir PV hücre tarafından soğurulduğunda, bir elektron-boşluk çifti üretebilir. Taşıyıcılardan biri p-n eklemine erişebilir ve PV hücre tarafından üretilen akıma katkıda bulunur. Taşıyıcılar, hücre akımına hiçbir net katkıda bulunmadan bir araya gelebilirler. *Kuantum verimi*, PV hücre kısa devre koşullarında çalıştırıldığında, elektrik akımına dönüştürülen fotonların yüzdesini (toplanan taşıyıcıları) belirtir. Silikon bir PV hücrenin dış kuantum verimi, iletim ve yansıma gibi optik kayıplara bağlıdır. Özellikle, bu kayıpları azaltmak için bazı ölçümler yapılabilir. Gelen toplam enerjinin %

10'una kadar ulaşabilen yansıma kayıpları, ortalama ışık yolunu değiştiren ışık yakalama yöntemi kullanılarak önemli düzeyde azaltılabilir. Kuantum veriminin, foton dalga boyunun veya enerjinin bir fonksiyonu olarak spektral bir ölçüm olarak tanımlanması çok yararlıdır. Bazı dalga boyları diğerlerinden daha etkili bir şekilde soğurulduğundan, kuantum veriminin spektral ölçümleri, yarı iletken yığını ve yüzeylerinin kalitesi hakkında önemli bilgiler verebilir. PV hücre tarafından dönüştürülen enerji bölümü hakkında bilgi vermediğinden, kuantum verimi genel enerji dönüşüm verimi ile aynı anlamda değildir.

Verime Etki Eden Etmenler:

PV hücre verimine etki eden faktörler şunlardır:

1. PV hücre yüzey malzemesinin ışınım özellikleri
2. Güneş ışınımının spektral özellikleri
3. Güneş ışınlarının PV hücre üzerine geliş açısı
4. Ortamdaki havanın sıcaklığı
5. PV hücrenin iç seri direncinden kaynaklanan kayıplar
6. PV hücrenin kalınlığı
7. PV hücrenin eğim açısı
8. PV hücrenin temizliği

Silikon PV hücrenin verimi; ışık yoğunluğu veya ışınım şiddeti, izleme açısı ve hücre sıcaklığı gibi çevresel etmenlere çok bağlıdır [9-11]. Açık devre gerilimi, kısa devre akımı, en yüksek çıkış gücü, dolun faktörü ve verimlilik gibi fotovoltajik değişkenler genellikle hücre sıcaklığından etkilenirken, en yüksek düzeye etkilenme *açık devre geriliminde* gerçekleşir. Bu nedenle, PV hücrenin açık devre gerilimi hücre sıcaklığına

karşı oldukça duyarlıdır. Açık devre gerilimi, dolun faktörü veren yüksek çıkış gücü sıcaklık ile azalırken, kısa devre akımı sıcaklık ile artar. Bu nedenle, sıcaklık katsayısı açık devre gerilimi, dolun faktörü ve en yüksek çıkış için negatif ve kısa devre akımı için pozitif değerdedir. *Kim ve ark.* [12], yüzey yapılandırma işleminin testere hasarına dayanan aşındırma işleminin kristal silikon PV hücreler üzerindeki etkisini araştırmışlar ve bir saatlik yapılandırma işleminden sonra her yüzey koşulu için morfolojik özellikler ve yansıma arasında hiçbir fark bulunmadığı sonucuna varmışlardır. *Choi ve ark* [13], tarafından Kristal silikon PV hücrenin hücre sıcaklığı ve frekansı ile elektriksel özellikleri üzerine bir araştırma yapılmıştır. İdealite faktörünün boşluk-yük bölgesinde sıcaklık ile düştüğünü ve yarı-nötr bölgede arttığını bulmuşlardır. *Tsuno ve ark.* [14], doğrusal enterpolasyon yöntemi ile sıcaklık ve ışınımın farklı güneş pillerinin akım-voltaj karakteristiklerine bağımlılığını araştırmış ve sıcaklık için doğrusal enterpolasyonun fiziksel geçerliliğinin p-n birleşiminin akım-gerilim özelliklerine bağlı olduğunu bildirmişlerdir. *Sabry ve Ghitas* [15], sıcaklığın silikon PV hücrelerin seri direnci üzerindeki etkisini araştırmışlar ve serinin direncinin sıcaklık ve aydınlatmalarla değiştiğini bildirmişlerdir.

Hücre sıcaklığı, kristal silikon PV hücrenin kalitesini ve verimini belirlemek için önemli bir değişkendir [16-21]. Kristal silikon hücre için akım-gerilim özellikleri aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır [22]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] + \left(V - \frac{IR_s}{R_{sh}} \right) - I_L \quad [2]$$

Burada; I_0 - ters doygunluk akımı, q -elektron yükü, n -diyotun idealite faktörü, k -Boltzmann sabiti, T -sıcaklık direnci, R_s -seri direnci, R_{sh} - şönt direnci ve I_L - ise ışık üretilen akımdır.

Silikon PV hücrenin kalitesini kontrol etmek ve bir PV hücrenin verimini belirlemek için çevresel değişkenlerin doğru bir şekilde bilinmesi gerekir. Çevresel değişkenler her zaman silikon PV hücrelerin verim özelliklerinde önemlidir.

Sıcaklıktan etkilenmeleri, PV hücrelerin doğal özelliklerinin bir sonucudur. PV hücreler, sıcaklık düştükçe daha yüksek gerim üretme eğilimi gösterirler, yüksek sıcaklıklarda gerilim kaybederler. Işık yansımaları azaltılarak, enerji dönüşüm etkinliği artırılır. Maksimum güç izleyicisinin işlevi, verimli artırmak için PV hücre dizisi tarafından eşdeğer yükü değiştirmek ve dizinin çalışma noktasını ayarlamaktır.

PV ilkeye dayalı elektrik üretiminin verimliliğini etkileyen başlıca faktörler PV hücre üretim teknolojisi ve ortam koşullarıdır. Günümüzde, tek kristal silikon, çok kristal silikon, çok eklemli ve yoğunlaştırıcı gibi birçok PV hücresi mevcuttur. Tek kristal silikon hücrelerin başlıca üstünlüğü, verimlerinin yüksek olmasıdır. Bu üstünlüklerinin yanı sıra, bu hücrelerin olumsuzluğu tek kristal silikon üretmek için karmaşık bir işlem gerekli olmasıdır. Çok kristal silikon hücrelerin, üretim işlemi daha basit olduğundan, tek kristal hücrelere kıyasla daha ucuzdur. Ancak, bunlar biraz daha az verimlidir. Tek kristal silikon bir PV hücresinin verimi sadece % 15 düzeyindedir. Bu verim değerini % 40 düzeyine kadar yükseltmek için, farklı bant aralıklarına sahip çok eklemli hücreler kullanılabilir. Ancak bu teknoloji daha karmaşık ve daha

pahalıdır. Bununla birlikte, verimi arttırmanın başka bir yolu, mercekler veya aynalar gibi ucuz yansıtıcı ekipmanlar kullanarak güneş ışınlarını PV hücrelere yoğunlaştırmaktır. Işınım şiddeti, sıcaklık ve kir/toz gibi bir PV güç sisteminin çıktısını etkileyen çeşitli ortam koşulları vardır. Açık devre gerilimi, güneş ışınımının artmasıyla logaritmik olarak artarken, kısa devre akımı doğrusal olarak artar. Böylece, çıkış gücü de artmış olur. Bununla birlikte, hücre sıcaklığındaki artışın başlıca etkisi açık devre gerilimindedir. Açık devre gerilimi, hücre sıcaklığı ile azalır.

Kısa devre akımı, hücre sıcaklığının artmasıyla az miktarda artar. Bu durumda hücre verimliliği azalır. Bir PV modülün verimini arttırmak için etkili bir yöntem, yüzeyinin çalışma sıcaklığını azaltmaktır. Bu yöntem, PV modülü soğutarak ve çalışma sırasında PV hücrelerde depolanan ısıyı azaltarak uygulanabilir. Ortam sıcaklığı yükseldikçe hücre sıcaklığı da yükselir ve sistemde kayıplar oluşur. Bu kayıpları önlemek için, PV dizilerin alt kısımlarından su dolaşımı sağlamak gibi soğutma sistemleri kullanılır.

Fotovoltaik modüllerin verimliliğini etkileyen bir diğer faktör modül yüzeyinin kirlenmesidir. PV modülü yüzeyinde güneş ışınımının bir kısmını bloke eden kir/toz birikebilir. Bu durum verimi düşürür. Kirlenmeden dolayı hücrelere iletilen güneş ışınımının da azalma olur. Işınımında ki bu azalma soğurulma miktarını azaltır ve üretimde kayıplar görülür. Modül yüzeyinde oluşan kirlilik yağışlardan, tozlanmadan vb. çevresel etkenlerden kaynaklanır. Modüllerin konumlandırılması verimi etkileyen bir diğer önemli konudur. Modüller en yüksek verimi güney cephesinde verirler. Modüllerin

hareketli bir yapı üzerinde tasarlanmaları durumunda güneş ışınımını izleyebilmekte ve günün her saatinde en yüksek verim alabilmektedir. Modülleri konumlandırmadan önce, bölgenin yıl içindeki sıcaklık değerleri bilinmelidir ve buna göre konumlandırma yapılmalıdır. Fotovoltaik modüllerin gölgede kalması da modül verimini etkiler. Gölgeye neden olan etkenler dağlar, ormanlık araziler, ağaçlar, binalar vb. çevresel etkenlerdir. Hücre üzerindeki küçük bir gölgelenme verime önemli ölçüde etki eder. Bir hücredeki gölgelenme diğer dizilerdeki hücrelerin verimini de önemli ölçüde etkiler. Dış etkilere kaynaklan gölgelenmenin yanı sıra aynı dizideki modül sırası öndeki modül sırası tarafından gölgelenebilir, bu da verimliliğe etki eder.

6. SONUÇ

PV hücrelerin enerji dönüşüm verimleri, uzun yıllardan bu yana araştırılmaktadır. Güneş pillerinin verimliliği, amorf silikon esaslı güneş pilleri için % 6'dan çok eklemli PV hücrelerde % 44.0'a ve hibrid bir pakete birleştirilmiş çoklu kalıplar için % 44.4 arasında değişmektedir. Piyasada bulunan çok kristal silikon PV hücreler için enerji dönüşüm verimi yaklaşık % 14–19 arasındadır. Bununla birlikte, güneş enerjisini artırmak için güneş ışınlarının odaklanarak yoğunlaştırılması gerekir. Işık yoğunluğunun artırılması durumunda, ışık tarafından üretilen taşıyıcılar artar ve verim % 15'e kadar yükselir. Yoğunlaştırıcı sistemler olarak adlandırılan bu sistemler, yüksek verimli GaAs hücrelerinin geliştirilmesinin sonucunda, maliyet rekabetine girmeye başlamışlardır. Yoğunlaştırma işlemi tipik olarak yoğunlaştırıcı optikler kullanılarak

gerçekleştirilir. Tipik bir yoğunlaştırıcı sistem, güneşin 6–400 katı bir ışık yoğunluğunu kullanabilir ve GaAs hücrenin verimini % 31'den % 35'e çıkarabilir. Katkılanmamış kristal silikon hücre verimi % 29.4 teorik verime yaklaşmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Öztürk, H.H. 2008. Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, BİRSEN Yayınevi, ISTANBUL, ISBN 978-975-511-502-3.
- [2] Öztürk, H.H., Kaya, D. 2013. Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji, Umuttepe Yayınları, Yayın No: 97, ISBN:978-605-5100-00-1.
- [3] Navruz T.S., 2008. Arabant yapılı güneş pillerinde verim optimizasyonu. Doktora, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-143.
- [4] Arora, N.D., Hauser, J.R., 1982. Temperature dependence of silicon solar cell characteristics. Sol. Energy Mater., 6, pp. 151–158.
- [5] Cuce, E., Cuce, P.M., Bali, T. 2013. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. App. Energy, 111, pp. 374–382.
- [6] Sharma, S.K., Im, H., Kim, D.Y., Mehra, R.M., 2014. Review on Se- and S-doped hydrogen a tetramorphous silicon films. Indian J. Pure Appl. Phys., 52, pp. 293–313.
- [7] Şenay, G. 2011. Çok Eklemli Güneş Pillerinde Detaylı Denge Modeli İle Verim Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı, Ankara.
- [8] Solanki, C.S., 2013. Solar photovoltaics: Fundamentals Technologies and Applications, PHI Learning Private Limited, New Delhi.

- [9] Khan F., Singh, S.N., Husain, M., 2010. Effect of illumination intensity on cell parameters of silicon solar cell Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 94, pp. 1473–1476.
- [10] Skoplaki, E., Palyvos J.A., 2009. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Sol. Energy, 83, pp. 614–624.
- [11] Chegaar, M., Hamzaoui, A., Namoda, A., Petit, P., Aillerie, M., Herguth, A. 2013. Effect of illumination intensity on solar cells parameters. Energy Procedia, 36, pp. 722–729.
- [12] Kim, H., Park, S., Kang, B., Kim, S., Tark, S.J., Kim, D., Dahiwal, S.S., 2013. Effect of texturing process involving saw-damage etching on crystalline silicon solar cells Appl. Surf. Sci., 284, pp. 133–137
- [13] Choi, P., Kim, H., Baek, D., Choi, B., 2012. A study on the electrical characteristic analysis of c-Si solar cell diodes. J. Semicond. Technol. Sci., 12, pp. 59–65.
- [14] Cai, F., Chao, W., Long, T.J., Xiong, L.D., Fu, H.S., Gang, X.Z., 2012. The influence of environment temperatures on single crystalline and polycrystalline silicon solar cell performance. Sci. China-Phys. Mech. Astron., 55, pp. 235–241.
- [15] Sabry, M., Ghitas, A.E., 2008. Influence of temperature on methods for determining silicon solar cell series resistance. J. Sol. Energy Eng., 129 (2008), pp. 331–335.
- [16] Dubey, S., Sarvaiya, J.N., Seshadri, B. 2013. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world a review Energy Procedia, 33, pp. 311–321.
- [17] Arjyadhara, P., Ali S.M., Chitralkha, J. 2013. Analysis of solar PV cell performance with change in irradiance and temperature Int. J. Eng. Comput. Sci., 2 (1), pp. 214–220.
- [18] Reich, N.H., Sark, W.G.J.H.M.V., Alsema, E.A., Lof, R.W., Schropp, R.E.I., Sinke, W.C., Turkenburg, W.C., 2009. Crystalline silicon cell performance at low light intensity Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 93, pp. 1471–1481.
- [19] Lammert, M.D., Schwarts, R.J., 1997. The integrated back contact solar cell: A silicon solar cell for use in concentrated sunlight IEEE Trans. Electron Devices, ED-24, pp. 337–342
- [20] Saran, A., Prasad, B., Chandril, S., Singh, S.P., Saxena, A.K., Pathak, M., Chahar, N., Bhattacharya, S., 2013. Study of temperature on performance of c-Si homo junction and a-Si/c-Si heterojunction solar cells Int. J. Renew. Energy Res., 3 (3), pp. 707–710.
- [21] Coello, J., Castro, M., Anton, I., Sala, G., Vazquez, M.A., 2004. Conversion of commercial Si solar cell to keep their efficient performance at 15 Suns Prog. Photovolt., Res. Appl., 12, pp. 323–331.
- [22] Khan F., Singh, S.N., Husain, M., 2010. Effect of illumination intensity on cell parameters of silicon solar cell Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 94, pp. 1473–1476.