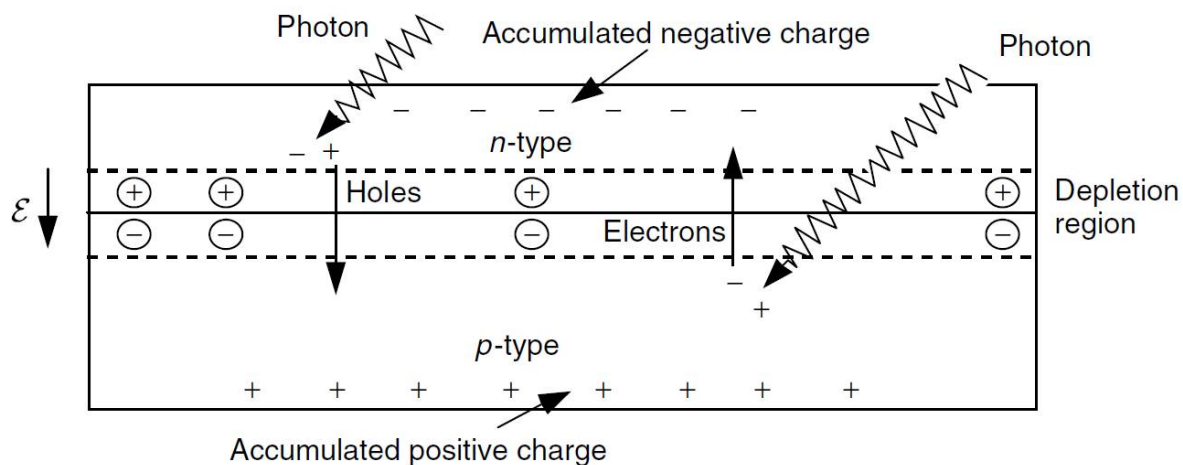
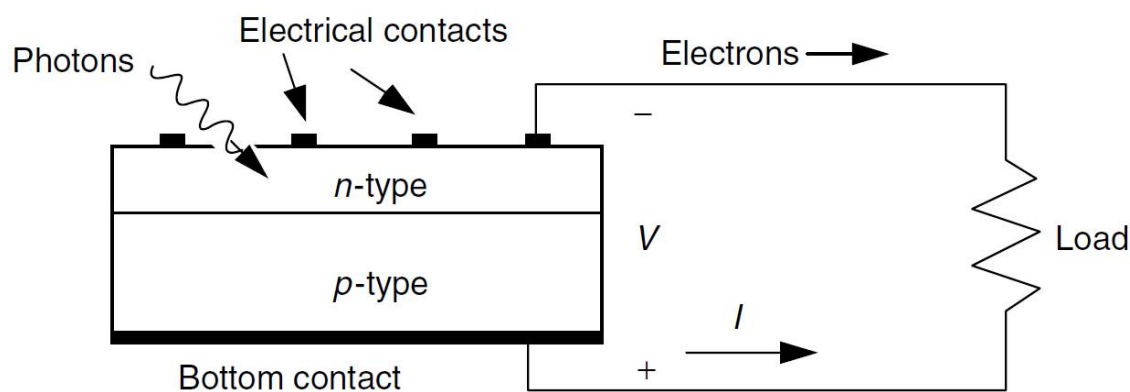


8-2-1 ساده‌ترین مدار معادل برای یک سلول خورشیدی

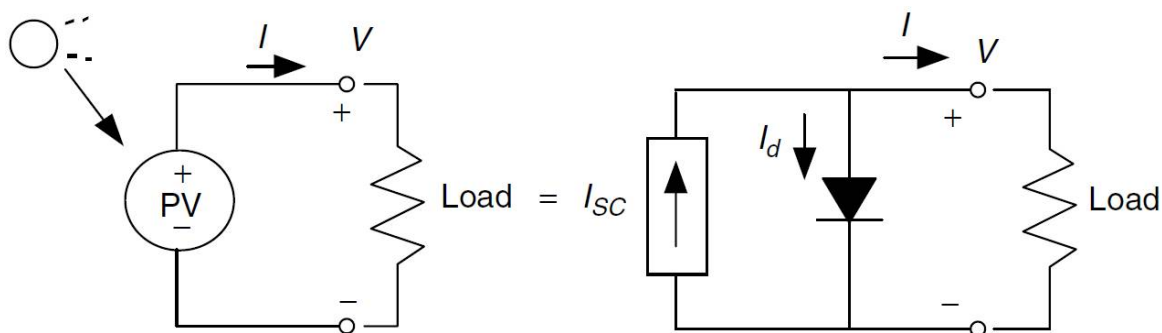
یک مدار معادل برای یک سلول PV از یک دیود واقعی موازی با یک منبع جریان ایده‌آل مطابق شکل 8-6 تشکیل شده است. منبع جریان ایده‌آل جریان را به نسبت شار خورشیدی که در معرض آن قرار می‌گیرد توزیع می‌کند.



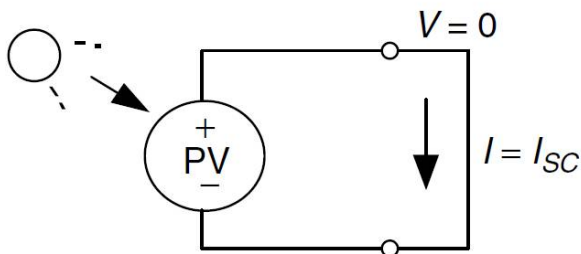
شکل 4-8 فوتونها جفتهای حفره- الکترون را در مجاورت اتصال تولید می کند میدان الکتریکی موجود در ناحیه تخلیه حفره ها را به درون سمت p و الکترون ها را به درون سمت n سلول جاروب می کند.



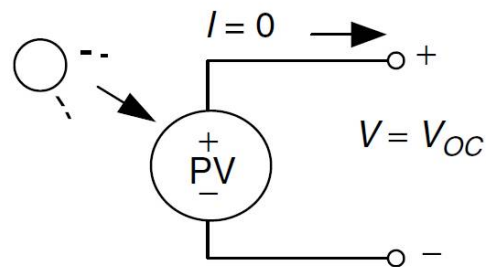
شکل 5-8 الکترون ها از اتصال سمت n به درون بار جاری می شوند و به سمت p بازمی گردند جایی که با حفره ها جفت می شوند. جریان قراردادی I در جهت مخالف است.



شکل 6-8 یک مدار معادل ساده برای یک سلول PV از یک منبع جریان موازی با یک دیود واقعی تشکیل شده است.



(a) Short-circuit current



(b) Open-circuit voltage

شکل 7-8 دو پارامتر مهم برای PV ها جریان اتصال کوتاه I_{SC} و ولتاژ مدار باز V_{OC} هستند.

دو شرط برای توجه خاص به PV واقعی و مدار معادل آن وجود دارد. همانطور که در شکل 7-8 نشان داده شده است

1-جریان جاری شده هنگامی که ترمینالها با هم اتصال کوتاه می شوند (جریان اتصال کوتاه I_{SC})

2- ولتاژ در طول ترمینالها هنگامی که اتصالها باز هستند. (ولتاژ مدار باز V_{OC}) هستند.

وقتی اتصالهای مدار معادل سلول PV با هم اتصال کوتاه می شوند، جریانی در دیود واقعی جاری می شود چون $V_d = 0$ ، بنابراین تمام جریان منبع ایده آل آن از اتصالهای اتصال کوتاه شده جاری می شود. این جریان را جریان اتصال کوتاه را I_{SC} می نامیم. اکنون می توان یک معادله ولتاژ - جریان برای مدار معادل سلول PV نوشت که در شکل 6-8 نشان داده شده است.

$$I = I_{SC} - I_d \quad (1-8)$$

میدانیم که جریان دیود از رابطه $I_d = I_0(e^{qv_d/KT} - 1)$ بدست می آید با جایگذاری در (1-8) معادله زیر بدست می آوریم:

$$I = I_{SC} - I_0 (e^{qV/kT} - 1) \quad (2-8)$$

نکته جالب اینکه عبارت دوم در رابطه 2-8 معادله دیود با علامت منفی است.. شکل 8-8 رابطه جریان - ولتاژ را برای یک سلول PV هنگامی که هوا تاریک (بدون نور خورشید) و روشن بر طبق رابطه 2-8 را نشان می‌دهد. هنگامی که اتصالهای PV باز هستند $I = 0$ معادله (2-8) را برای ولتاژ مدار باز V_{OC} حل کرد:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1\right) \quad (3-8)$$

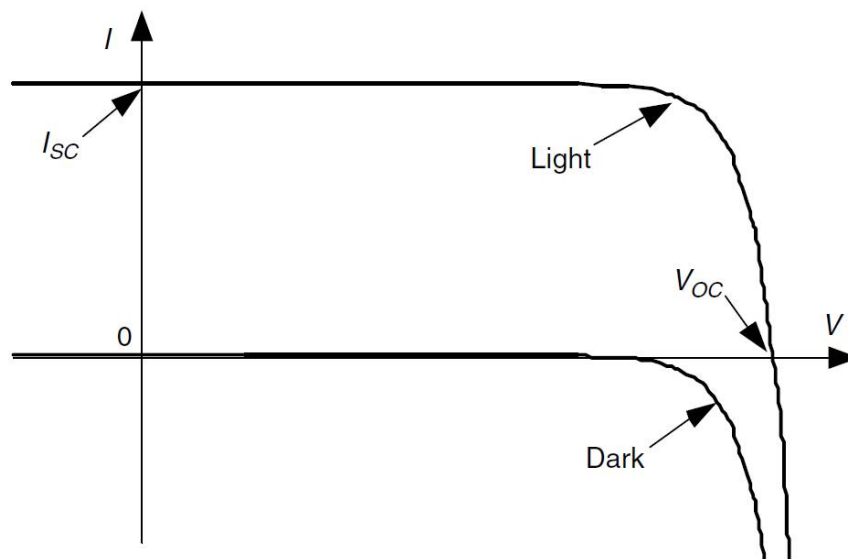
و در 25°C (2-8) و (3-8) به شکل زیر درمی‌آیند:

$$I = I_{SC} - I_0 (e^{38.9V} - 1) \quad (4-8)$$

و

$$V_{OC} = 0.0257 \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1\right) \quad (5-8)$$

در هر دو این معادله‌ها جریان اتصال کوتاه، I_{SC} ، مستقیماً مربوط به قرار گرفتن در معرض تابش اشعه خورشید است که بدین معنی است که می‌توان مجموعه‌ای از منحنی‌های ولتاژ - جریان PV را برای نور خورشید متغیر کشید. همچنین اغلب به مشخصات آزمایشگاهی عملکرد فتوولتائیکها "بر متر مربع" ناحیه اتصال داده می‌شود، که در آن جریانها در معادله‌های بالا به عنوان چگالی جریان نوشته می‌شوند. هر دو نکته گفته شده در مثالهای زیر تشریح شده‌اند.



شکل 8-8 رابطه جریان - ولتاژ PV برای سایه (بدون خورشید) و روشن (سلول نورانی شده)

منحنی خاموشی همان منحنی دیود برعکس شده است منحنی روشن، منحنی تاریکی بعلاوه I_{SC} است.

مثال 1-8 منحنی I-V برای یک سلول PV. یک سلول فتوولتائیک 100cm^2 با جریان اشباع معکوس

$I_0 = 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ در نظر بگیرید. در خورشید کامل این سلول یک جریان اتصال کوتاه معادل 40mA/cm^2 در

25°C تولید می کند. ولتاژ مدار باز را در خورشید کامل و برای 50% نور خورشید بیابید. نتایج را ترسیم کنید.

حل: جریان اشباع معکوس I_0 برابر است با $10^{-12} \text{ A/cm}^2 \times 100 \text{ cm}^2 = 1 \times 10^{-10} \text{ A}$ در خورشید کامل I_{SC} برابر

است با $4\text{A} = 0.04\text{A/cm}^2 \times 100 \text{ cm}^2$ از (5-8) ولتاژ مدار باز برابر است با:

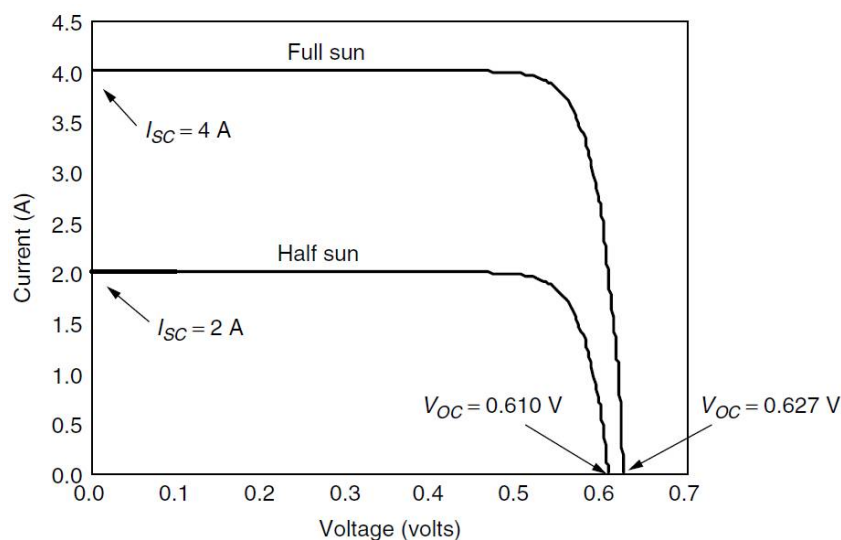
$$V_{OC} = 0.0257 \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) = 0.0257 \ln \left(\frac{4}{10^{-10}} + 1 \right) = 0.627 \text{ V}$$

چون جریان اتصال کوتاه با شدت نور خورشید متناسب است در 50% نور خورشید $I_{SC} = 2 \text{ A}$ و ولتاژ مدار باز

برابر است با:

$$V_{OC} = 0.0257 \ln\left(\frac{2}{10^{-10}} + 1\right) = 0.610 \text{ V}$$

رسم (4-8) شکل زیر را به ما می‌دهد.



2-2-8 یک مدار معادل دقیق‌تر برای یک سلول PV

مواقعی وجود دارد که مدار معادل PV پیچیده‌تری از آن که در شکل 6-8 نشان داده شد مورد نیاز است. به عنوان مثال اثر سایه انداختن بر یک رشته از سلولها که به شکل سری متصل شده‌اند را در نظر بگیرید (شکل 8-9 این سلولها را نشان می‌دهد). اگر هر کدام از سلولهای زنجیره در سایه باشد (بر آن سایه افتاده باشد) جریانی تولید نمی‌کند. در مدار معادل ساده شده برای سلول واقع در سایه، جریان در درون منبع جریان آن سلول صفر است و دیودش بایاس معکوس می‌شود بنابراین آن دیود نیز هیچ جریانی عبور نمی‌دهد (غیر از یک مقدار ناچیز جریان اشباع معکوس). این بدین معنی است که مدار معادل ساده به ما می‌گوید در صورتی که سلولها در سایه باشند، توانی به بار نمی‌رسد. این واقعیت است که ماژولهای PV به سایه بسیار حساس هستند، ولی وضعیت آنقدرها هم بد نیست. بنابراین ما نیاز به مدل پیچیده‌تری داریم اگر بخواهیم که به واقعیتها مانند مسئله سایه غلبه کنیم.

شکل 10-8 یک مدار معادل PV را نشان می‌دهد که شامل مقداری مقاومت نشتی موازی R_p می‌باشد. منبع جریان

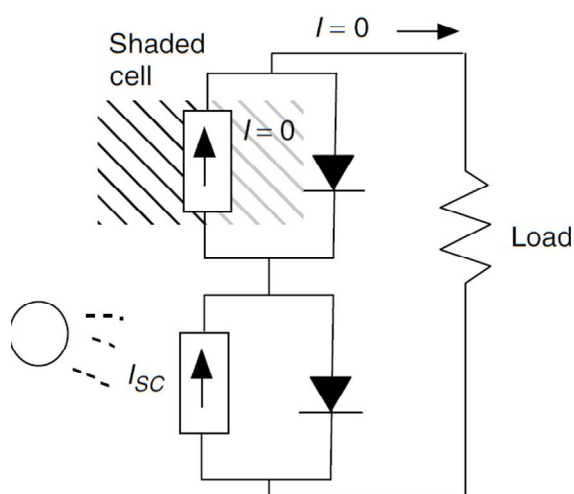
ایده‌آل I_{SC} در این حالت جریان را به دیود، مقاومت موازی و بار تحویل می‌دهد:

$$I = (I_{SC} - I_d) - \frac{V}{R_p} \quad (6-8)$$

عبارت موجود در پرانتز (6-8) همان جریانی است که برای مدل ساده داشتیم. بنابراین آنچه معادله (6-8) بیان

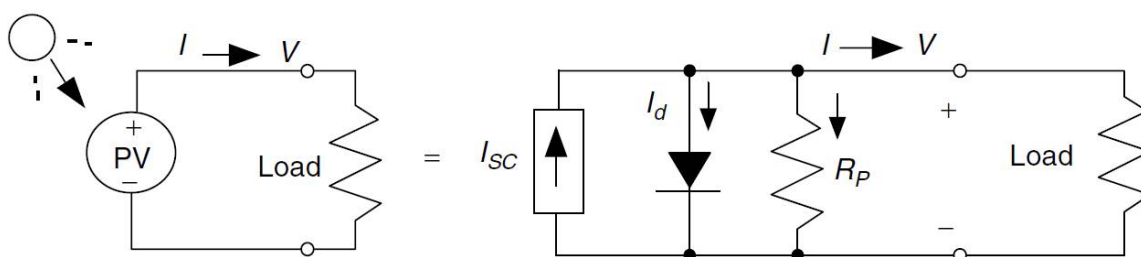
می‌کند اینست که در هر ولتاژ داده شده، مقاومت نشتی موازی باعث می‌شود که جریان بار برای مدل ایده‌آل به

V/R_p کاهش پیدا کند، همانطور که در شکل 11-8 نشان داده شده است.

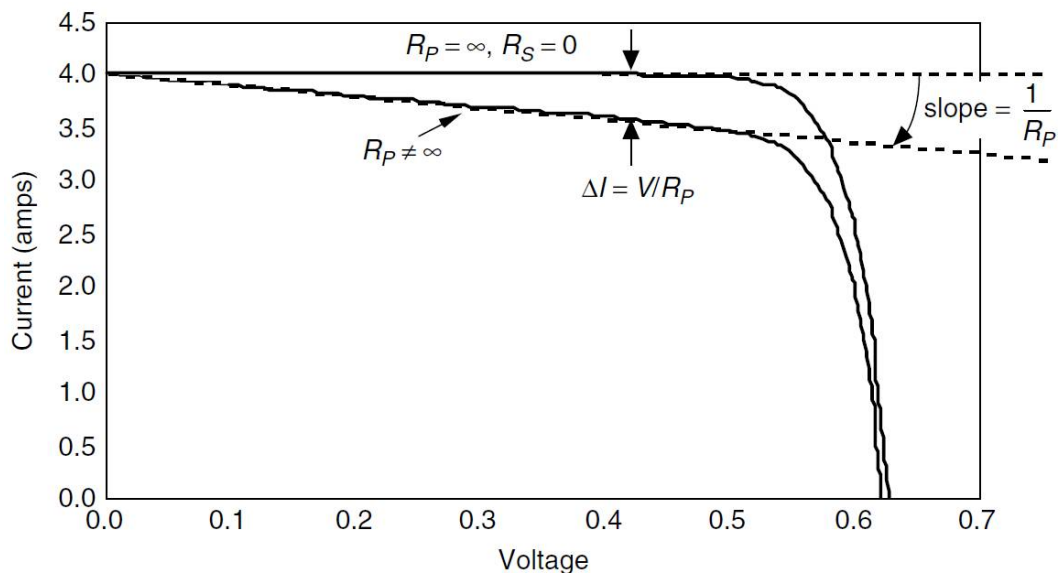


شکل 9-8 یک مدار معادل ساده از یک رشته از سلولهای سری در صورتی که در سایه باشد جریانی به بار جاری نمی‌کند. یک مدل پیچیده‌تر

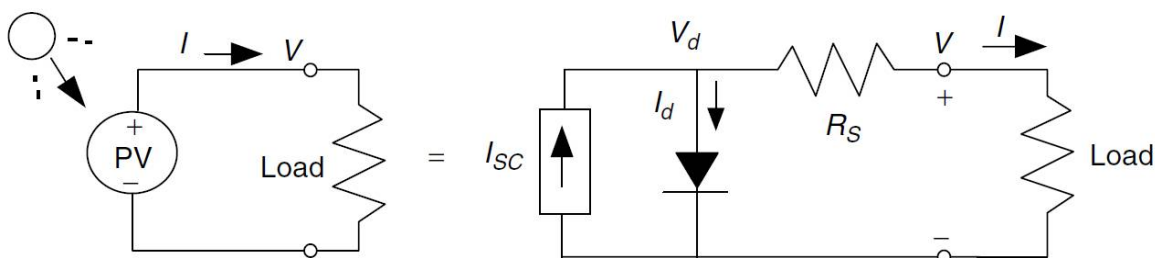
می‌تواند این مشکل را حل کند.



شکل 10-8 مدار معادل ساده PV با یک مقاومت موازی افزوده شده



شکل 8-11 تعدیل مدار معادل PV ایده‌آل شده بوسیله اضافه کردن مقاومت موازی باعث می‌شود که جریان در هر ولتاژی به مقدار V/R_p افت کند.



شکل 8-12 یک مدار معادل PV با مقاومت سری برای سلولی که تلفات کمتر از 1٪ بواسطه مقاومت نشتی‌اش دارد.

برای اینکه یک سلول به واسطه مقاومت موازی تلفاتی کمتر از 1٪ داشته باشد مقاومت R_p باید در حدود زیر باشد یعنی:

$$R_p > \frac{100V_{OC}}{I_{SC}} \quad (7-8)$$

برای یک سلول بزرگ I_{SC} احتمالاً حدود 7A و V_{OC} احتمالاً حدود 0/67 ولت می‌باشند، این مطلب را به ما می‌گوید که مقاومت موازی آن باید بزرگتر از حدود 9 اهم باشد.

یک مدار معادل دقیقتر شامل مقاومت سری و مقاومت موازی خواهد بود. قبل از آن که مدل را ایجاد کنیم به شکل 12-8 توجه کنید که در آن مدار معادل PV اصلی به منظور دخیل کردن مقداری مقاومت سری R_s تعدیل شده است. مقداری از این مقاومت می تواند مقاومت اتصال ناشی از اتصال بین سلول و بست سیم آن باشد و مقداری از آن ممکن است بواسطه مقاومت خود نیمه هادی باشد.

برای تحلیل شکل 12-8 با مدار معادی ساده شروع می کنیم

$$I = I_{SC} - I_d = I_{SC} - I_0 (e^{qV_d/kT} - 1) \quad (8-8)$$

و سپس اثر R_s را اضافه می کنیم:

$$V_d = V + I \cdot R_s \quad (9-8)$$

در نتیجه:

$$I = I_{SC} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + I \cdot R_s)}{kT} \right] - 1 \right\} \quad (10-8)$$

معادله (10-8) می تواند به عنوان منحنی I-V، PV اصلی تفسیر شود با ولتاژی که در هر جریان داده شده با $\Delta V = I \cdot R_s$ به سمت چپ شیفت پیدا می کند؛ همانطور که در شکل 13-8 نشان داده شده است.

برای سلولی که باید تلفات کمتر از 1% بواسطه مقاومت سری داشته باشد، R_s باید کمتر از حدود زیر باشد:

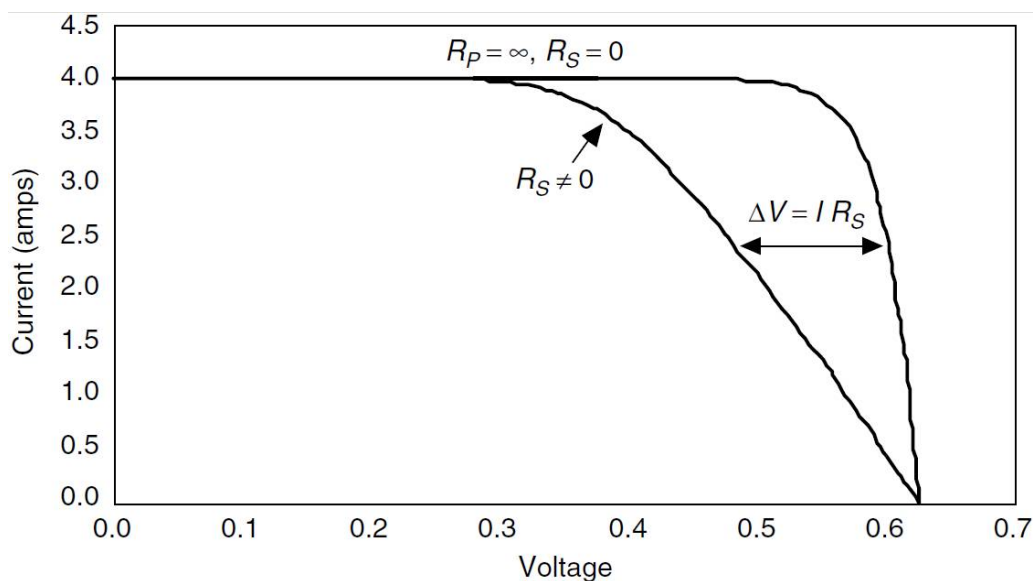
$$R_s < \frac{0.01 V_{OC}}{I_{SC}} \quad (11-8)$$

که برای یک سلول بزرگ با $I_{SC} = 7 \text{ A}$ و $V_{OC} = 0.6 \text{ V}$ کمتر از 0.0009Ω می شود.

در نهایت به مدار معادل PV بوسیله دخیل کردن مقاومت سری و موازی همانطور که در شکل 8-14 نشان داده شده

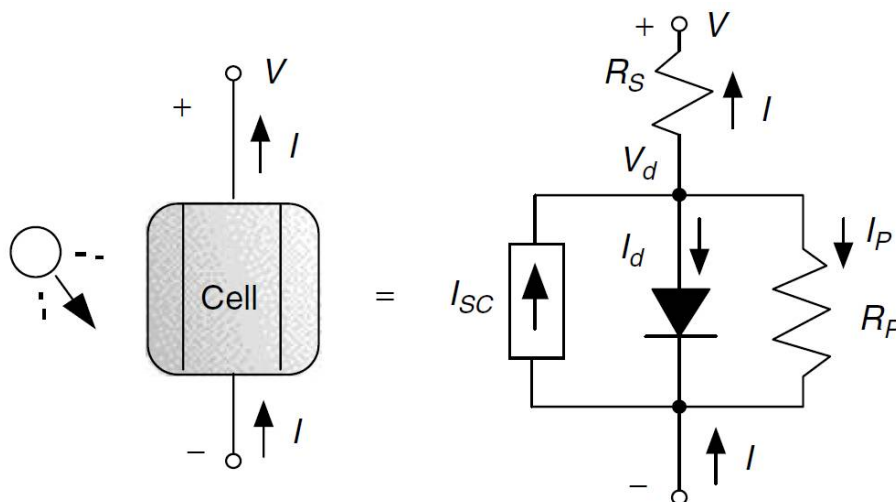
است عمومیت دهیم، می توان معادله زیر را برای جریان و ولتاژ نوشت:

$$I = I_{SC} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + I \cdot R_S)}{kT} \right] - 1 \right\} - \left(\frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \right) \quad (12-8)$$



شکل 8-13 اضافه کردن مقاومت سری به مدار معادل PV باعث می شود که ولتاژ در هر جریان داده شده با $\Delta V = I \cdot R_S$ به سمت چپ

شیفت پیدا کند.



شکل 8-14 مدار معادل دقیق تر برای یک سلول PV شامل هر دو مقاومت سری و موازی

تحت فرض استاندارد دمای سلول 25°C ، (12-8) را به شکل زیر درمی آید:

$$I = I_{SC} - I_0 \left[e^{38.9(V + IR_S)} - 1 \right] - \frac{1}{R_p} (V + I \cdot R_S) \quad 25^{\circ}\text{C} \quad \text{در دمای} \quad (13-8)$$

متأسفانه (13-8) یک معادله پیچیده است که برای آن راه حل واضحی چه برای ولتاژ V و چه برای جریان I وجود ندارد. هرچند راه حل صفحه گسترده¹³⁰ نسبتاً سر راست است و این مزیت اضافی را دارد که ما را قادر می سازد منحنی I در مقابل V را به آسانی بدست آوریم. رویکرد، بر پایه مقادیر افزایشی ولتاژ دیود، V_d ، در صفحه گسترده می باشد. برای هر مقدار V_d ، مقادیر مرتبط جریان I و ولتاژ V به آسانی بدست می آیند. با استفاده از علامت قرار داده شده در شکل 8-14 و اعمال قانون جریان کریشف به گره بالای دیود، می توان نوشت:

$$I_{SC} = I + I_d + I_p \quad (14-8)$$

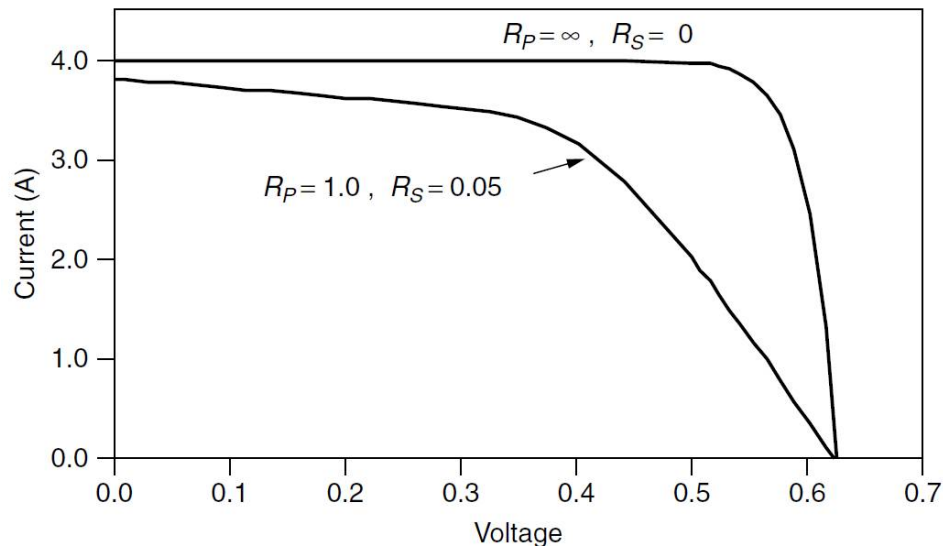
با جایگزین کردن معادله جریان دیود در 25°C :

$$I = I_{SC} - I_0 (e^{38.9V_d} - 1) - \frac{V_d}{R_p} \quad (15-8)$$

با یک مقدار فرضی V_d در یک صفحه گسترده، جریان I می تواند از (15-8) پیدا شود. سپس ولتاژ در طول یک سلول تکی می تواند از رابطه زیر پیدا شود.

$$V = V_d - I \cdot R_S \quad (16-8)$$

رسم معادله (6-8) برای یک مدار معادل با $R_p = 1 \Omega$ و $R_s = 0.05 \Omega$ این روش را در شکل 8-15 نشان داده شده است. همانطور که می توان انتظار داشت منحنی مشخصات شکل 8-11 و 8-13 را با هم ترکیب می کند.



شکل 8-15 مقاومت سری و موازی در مدار معادل PV ولتاژ و جریان تحویلی را کاهش می دهد. برای بهبود عملکرد سلول R_p بالا و R_s پایین مورد نیاز است.

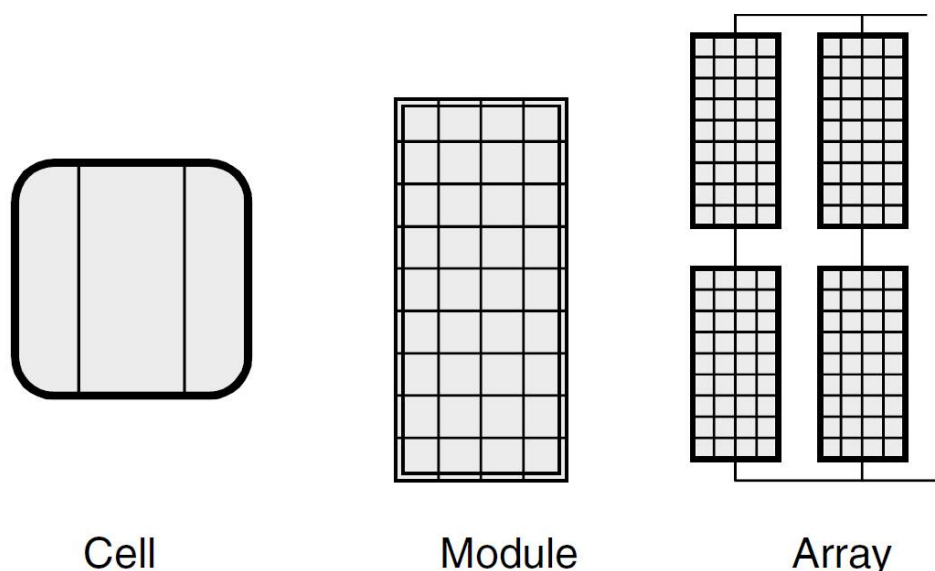
8-3- از سلولها تا ماژولها¹³¹ و آرایشها¹³²

از آنجایی که یک سلول تکی تنها حدود 0.5 ولت تولید می کند، صرفاً استفاده از یک سلول تنها کاربردی ندارد. بجای آن یک تعداد سلول بصورت سری در بسته های مقاوم در برابر آب و هوا و با دوام متصل شده است که یک ماژول گفته می شود. یک ماژول نمونه 36 سلول بصورت سری دارد و اغلب به عنوان یک "ماژول 12 ولت" در نظر گرفته می شود حتی اگر ولتاژی بالاتر از آن بدهد. برخی ماژولهای 12 ولت صرفاً 33 سلول دارند همانطور که بعداً خواهیم دید، ممکن است در سیستمهای شارژر باتری استفاده می شود. ماژولهای 72 سلوله اکنون کاملاً معمول

¹³¹ - MODULES

¹³² - ARRAYS

هستند که در برخی از آنها همه سلولها بصورت سری متصل شده‌اند که در چنین حالتی به آنها ماژولهای 24 ولت گفته می‌شود. برخی ماژولهای 72 سلولی می‌توانند بصورت ترکیبی متصل شوند تا به عنوان ماژولهای 24 ولت با 72 سلول سری یا ماژولهای 12 ولت با دو رشته موازی که هر کدام 36 سلول سری در خود دارند، از آنها استفاده شود. ماژولهای هیبریدی، در عوض، می‌توانند بصورت سری متصل شوند تا ولتاژ را افزایش دهند و می‌توانند بصورت موازی متصل شوند تا جریان را افزایش دهند که هر کدام از آنها توان تولید می‌کند. عامل مهم در طراحی سیستم PV تصمیم‌گیری راجع به این موضوع است که چند ماژول باید بطور سری و چند ماژول بصورت موازی به منظور تامین میزان انرژی مورد نیاز باید به هم متصل شوند. این ترکیبها از ماژولها به عنوان "آرایش"¹³³ اطلاق می‌شوند. شکل 8-16 این تفاوت بین سلول، ماژول و آرایش را نشان می‌دهد.

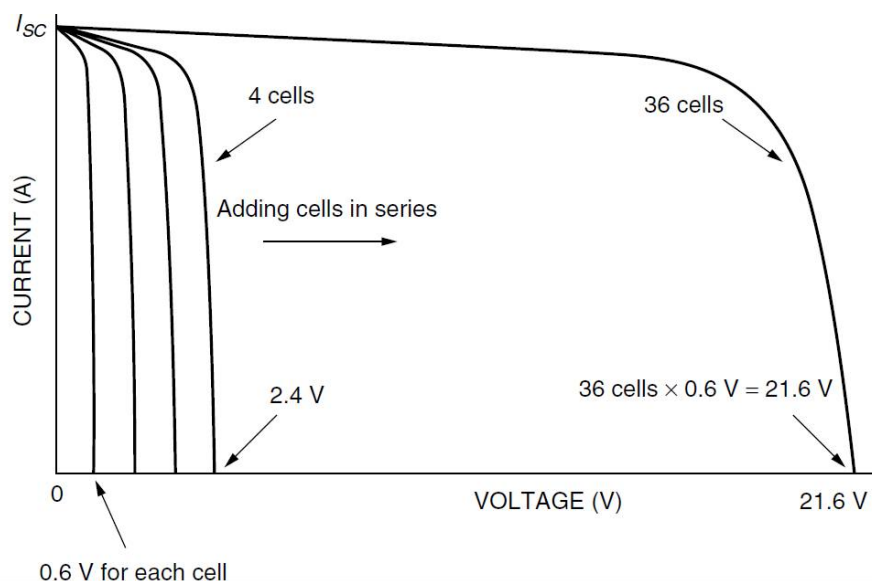


شکل 8-16 سلول PV، ماژول و آرایش

¹³³ array

8-4- از سلول‌ها به یک ماژول

وقتی سلول‌ها بشکل سری متصل می‌شوند همگی یک جریان را حمل می‌کنند و در جریان داده شده ولتاژ آنها با هم جمع می‌شود همانطور که در شکل 8-17 نشان داده شده است. این بدین معنی است که می‌توانیم به راه حل صفحه گسترده (8-13) به منظور یافتن یک ولتاژ ماژول مجموع V_{module} با ضرب n تعداد سلول‌ها در ماژول (8-15) ادامه دهیم.



شکل 8-17 برای سلول‌های سیم‌بندی شده بشکل سری، ولتاژ آنها در هر جریان جمع می‌شوند و یک ماژول نوعی 36 سلول را تشکیل می‌دهند.

$$V_{\text{module}} = n(V_d - I \cdot R_s) \quad (8-17)$$

مثال 8-2 ولتاژ و جریان از یک ماژول PV. یک ماژول PV از 36 سلول همانند تشکیل شده است که همگی بصورت سری متصل شده‌اند. با قرار دادن در معرض نور شدید خورشید (1kW/m^2)، هر سلول جریان

اتصال کوتاه $I_{sc} = 3/4A$ و در دمای $25^{\circ}C$ جریان اشباع معکوس آن $I_0 = 6 \times 10^{-10} A$ می باشد. مقاومت

موازی $R_p = 6/6 \Omega$ و مقاومت سری $R_s = 0/005 \Omega$ می باشد .

الف) ولتاژ، جریان و توان تحویل داده شده را هنگامی که ولتاژ اتصال هر سلول 0/5 ولت می باشد بیابید.

ب) صفحه گسترده ای برای I و V ایجاد کنید و چند خط خروجی برای نشان دادن چگونگی کار آن ارائه کنید.

حل:

الف) با استفاده از $V_d = 0/57 V$ در (8-15) همراه با اطلاعات دیگر جریان را به شکل زیر می دهد:

$$I = I_{SC} - I_0 (e^{\frac{38.9}{V_d}} - 1) - \frac{V_d}{R_p}$$
$$= 3,4 - 6 \times 10^{-10} (e^{38,9 \times 0,50} - 1) - \frac{0.5}{6.6} = 3,16 A$$

تحت این شرایط (8-17) ولتاژ تولید شده بوسیله ماژول 36 سلولی

$$V_{module} = n (V_d - I \cdot R_s) = 36 (0,50 - 3,16 \times 0,005) = 17,43 V$$

بنابراین توان تحویلی برابر است با

$$p(\text{watts}) = V_{module} \cdot I = 17,43 \times 3,16 = 55,0 W$$

ب) یک صفحه گسترده ممکن است چیزی شبیه زیر باشد.

$n = 36$ تعداد سلولها

$6/6 =$ سلول / مقاومت موازی R_p (اهم)

0/005 = سلول / مقاومت سری R_S (اهم)			
-10 E 6/00 = جریان اشباع مخالف I_0 (A)			
3/4 = جریان اتصال کوتاه در نور شدید خورشید (A)			
V_d	$I = I_{SC} - I_0 (e^{\frac{38.9 V_d}{R_p}} - 1)$	$V_{module} = n (V_d - I \cdot R_s)$	$p(watts) = V_{module} \cdot I$
0/49	3/21	17/06	54/80
0/50	3/16	17/43	55/02
0/51	3/07	17/81	45/75
0/52	2/96	18/19	53/76
0/53	2/78	18/58	51/56
0/54	2/52	18/99	47/89
0/55	2/14	19/41	41/59

توجه کنید که ما نقطه ماکزیمم توان را برای این ماژول بدست آورده‌ایم که در $I = 3/16A$ ، $V = 17/43 V$ و W

$p = 55$ می‌باشد. این به عنوان یک ماژول 55 w تعریف می‌شود.

8-5- از ماژول‌ها به آرایه‌ها

ماژول‌ها می‌توانند به منظور افزایش ولتاژ بصورت سری متصل شوند و به منظور افزایش جریان بشکل موازی متصل

شوند. آرایه‌ها از ترکیب‌هایی از ماژول‌های به صورت سری و موازی به منظور افزایش توان تشکیل شده‌اند. برای

ماژول‌های سری، منحنی‌های $I-V$ در طول محور ولتاژ به سادگی اضافه می‌شوند. یعنی در هر جریان داده شده (که

در هر ماژول جاری می‌شود)، ولتاژها با هم جمع می‌شوند، چنانچه در شکل 8-18 نشان داده شده است، ولتاژ کل

برابر با مجموع ولتاژ هر کدام از ماژول‌ها هست. در حالت موازی شرایط متفاوت هست بدین معنی که در هر ولتاژ

داده شده، منحنی I-V مربوط به ترکیب موازی صرفاً جمع جریانهای تکی ماژول در آن ولتاژ است. شکل 8-19

منحنی I-V را برای سه ماژول موازی نشان می دهد.

وقتی توان بالاتری مورد نیاز باشد، آرایه معمولاً از ترکیب ماژولهای سری و موازی می باشد که منحنی I-V مجموع

برای آن، مجموع منحنی های I-V ماژول فردی می باشد.

دو راه برای تصور کردن اتصال یک ترکیب سری / موازی ماژولها وجود دارد: ماژولهای سری به صورت ردیفی

باشند و سپس ردیفها با هم موازی شوند چنانچه در شکل 8-20a نشان داده شده است، یا ماژولهای اول با هم

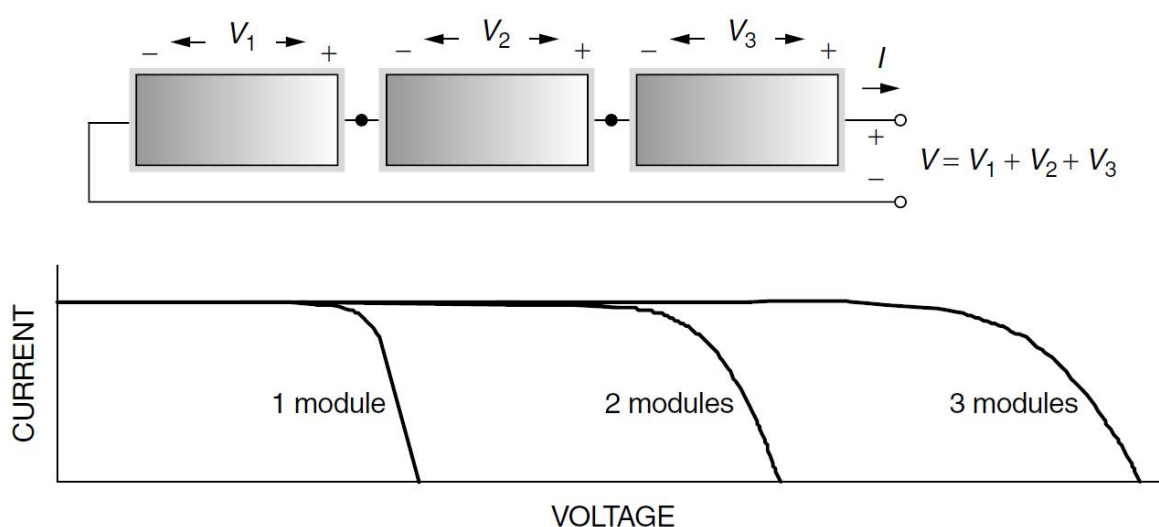
موازی متصل شوند و سپس آن واحدها بصورت سری پشت سر هم قرار گیرند چنانچه در شکل 8-20b نشان داده

شده است. منحنی I-V مجموع، برابر با جمع منحنی های ماژول تکی می باشد که در هر حالت وقتی که همه چیز

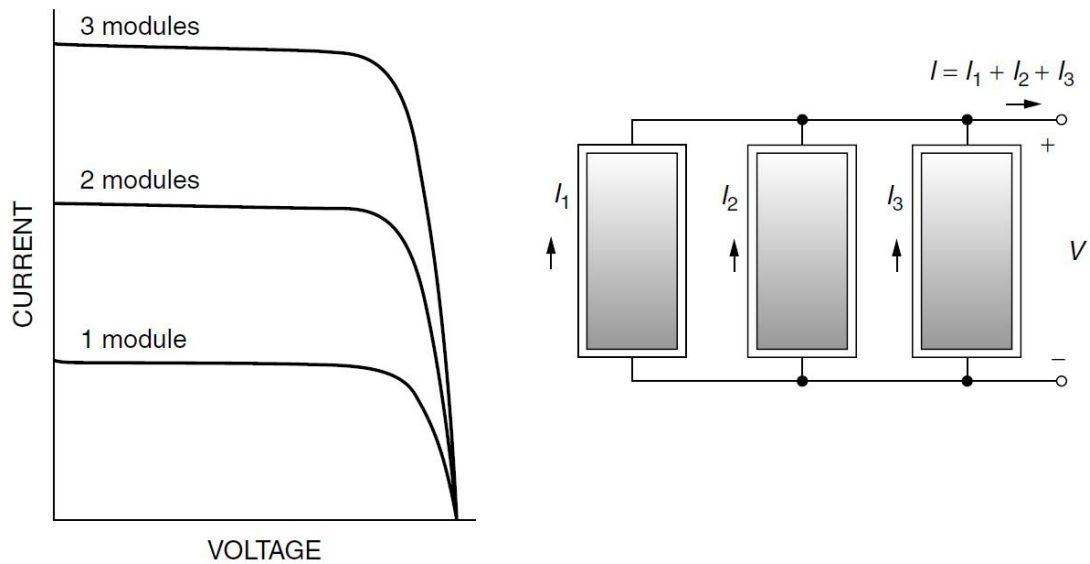
درست کار کند یکسان است. دلایلی برای ترجیح اتصال بصورت موازی (شکل 8-32a) وجود دارد. اگر کل

زنجیره بدلیلی از سرویس خارج شود، آرایه هر مقدار ولتاژی که بوسیله بار مورد نیاز است تأمین می کند. اگر

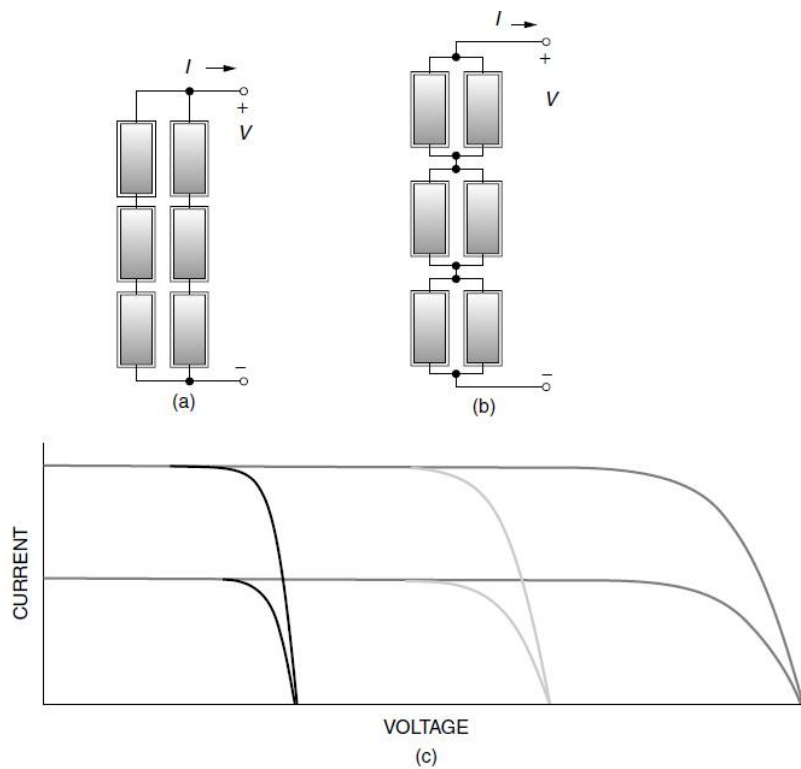
هنگامی که یک گروه موازی از ماژولها خارج می شود ه جریان کاهش پیدا می کند ، ولی موردی ندارد.



شکل 8-18 برای ماژولهای سری در هر جریان داده شده ولتاژها جمع می شوند.



شکل 8-19 برای ماژولهای موازی در هر ولتاژ، جریانهای جمع می‌شوند.



شکل 8-20 دو راه برای اتصال آرایه به شکل سری و موازی. اگر منحنی‌های $I-V$ برای آرایه‌ها یکسان است، دو ردیف که هر کدام سه ماژول دارد ترجیح دارد (a). منحنی $I-V$ مجموع آرایه در (C) نشان داده شده است.

6-8- منحنی PV ماژول I-V تحت شرایط آزمایش استاندارد (STC¹³⁴)

اکنون یک ماژول PV مجزا را در نظر بگیرید که میخواهید آن را به یک بار متصل نمائید (شکل 8-21). بار ممکن است یک موتور dc برای به حرکت درآوردن یک پمپ یا یک باتری باشد. قبل از اتصال به بار، قرار دادن ماژول زیر نور خورشید یک ولتاژ مدار باز V_{OC} را تولید خواهد کرد، اما هیچ نوع جریانی به گردش در نمی آید. اگر ترمینال‌های ماژول اتصال کوتاه داشته باشند، جریان کوتاه مدار I_{SC} به گردش درمی آید، اما ولتاژ خروجی صفر خواهد بود. در هر دو مورد، از آنجائیکه توان محصول جریان و ولتاژ است، هیچ توانی توسط ماژول انتقال داده نشده و هیچ توانی توسط بار دریافت نخواهد شد. زمانیکه بار بصورت واقعی اتصال داده شده است، ترکیبی از جریان و ولتاژ ایجاد شده و توان انتقال داده خواهد شد. برای محاسبه مقدار توان، باید ویژگی‌های منحنی I-V ماژول و بار را در نظر بگیریم.

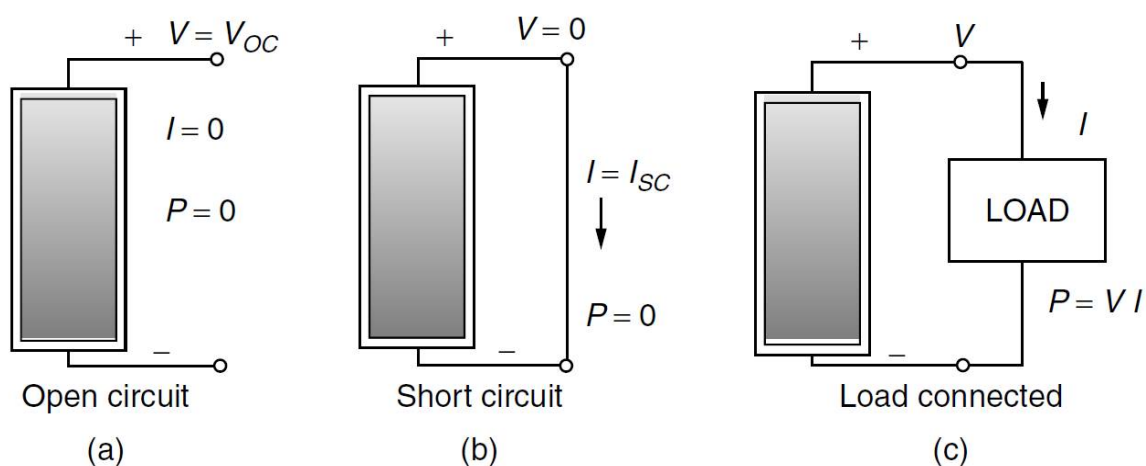
شکل 8-22 نشان‌دهنده منحنی عمومی I-V برای ماژول PV است و بسیاری از پارامترهای کلیدی شامل ولتاژ مدار باز (V_{OC}) و جریان مدار کوتاه (I_{SC}) را شناسایی می‌کند. همچنین محصول جریان و ولتاژ که توان انتقال داده شده توسط ماژول است نشان داده شده است. در دو سمت انتهایی منحنی I-V، توان خروجی صفر است زیرا در این نقاط ولتاژ و یا جریان صفر هستند. نقطه حداکثر توان (MPP^{135}) در نزدیکی زانوی منحنی قرار دارد که در آن میزان جریان و ولتاژ به مقدار حداکثر می‌رسد. ولتاژ و جریان در MPP گاهی اوقات بصورت V_m و I_m برای موارد عمومی و بصورت V_R و I_R (ولتاژ و جریان نامی) تحت شرایط خاص که متناظر با شرایط آزمایش ایده‌آل می‌باشند علامت گذاری می‌شوند.

یک روش دیگر برای تجسم کردن مکان نقطه حداکثر توان با تصور تلاش جهت یافتن بزرگترین مستطیل ممکن است که زیر منحنی I-V قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل 8-23 نشان داده شده است، اضلاع مستطیل با جریان

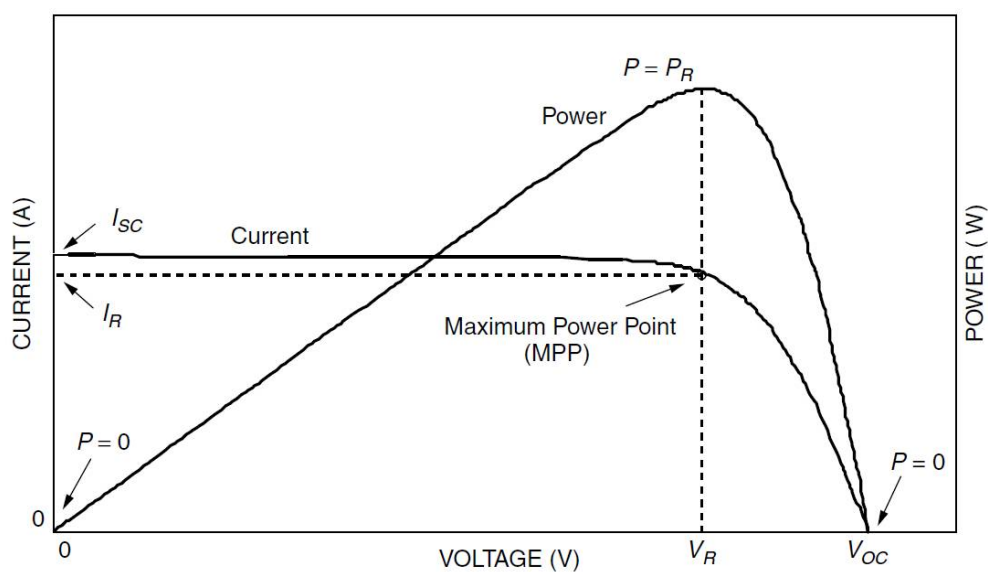
¹³⁴ Standard Test Conditions

¹³⁵ maximum power point

و ولتاژ متناظر می‌باشد، بنابراین مساحت آن توان است. مقدار دیگری که اغلب برای مشخص کردن عملکرد ماژول مورد استفاده قرار می‌گیرد ضریب پری (FF^{136}) است. ضریب پری نسبتی از توان در نقطه ماکزیمم به محصول V_{OC} و I_{SC} است، بنابراین FF میتواند به عنوان نسبت مساحت دو مستطیل مانند شکل 8-23 است.

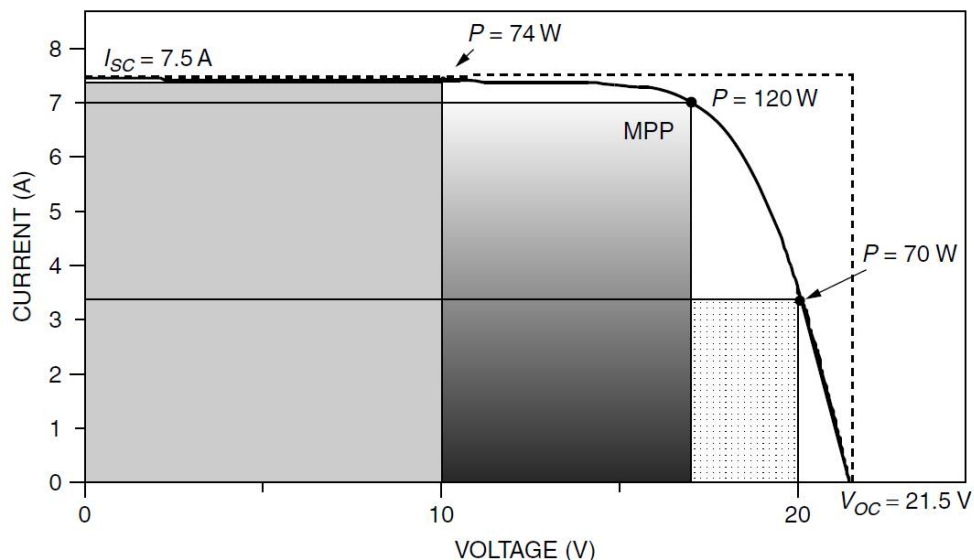


شکل 8-21 زمانیکه مدار باز (a) و یا کوتاه (b) است توان انتقال داده نمی‌شود. زمانیکه بار متصل می‌شود (c)، جریان مشابه در امتداد بار و ماژول به حرکت درآمده و ولتاژ مشابه در امتداد آنها شکل می‌گیرد.



^{۱۳۶} Fill factor

شکل 8-22 منحنی I-V و توان خروجی برای یک ماژول PV، در نقطه حداکثر توان (MPP) ماژول بیشترین توان را انتقال می‌دهد که می‌تواند تحت شرایط نور آفتاب و دما مانند منحنی I-V رسم شده باشد.



شکل 8-23 نقطه حداکثر توان (MPP) متناظر با بزرگترین مستطیل است که می‌تواند زیر منحنی I-V قرار گیرد. ضریب پری (FF) نسبت مساحت (توان) در MPP به سطح شکل گرفته با یک مستطیل با اضلاع V_{OC} و I_{SC} است.

ضریب پری با مقدار حدودی 70 تا 75 درصد برای ماژول‌های خورشیدی سیلیکونی کریستال عمومی است، در حالیکه این مقدار برای ماژول‌های سیلیکونی بی‌شکل در حدود 50 تا 60 درصد می‌باشد.

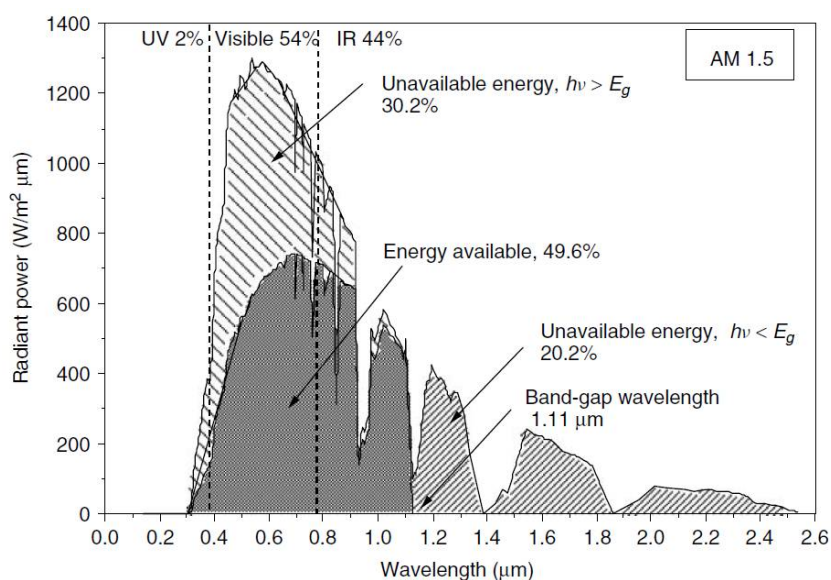
$$\text{FF (ضریب پری)} = \frac{\text{power at the maximum power point}}{V_{OC} I_{OC}} = \frac{V_R I_R}{V_{OC} I_{OC}} \quad (18-8)$$

جدول 2-8 مثال‌هایی از داده‌های عملکرد ماژول PV تحت شرایط استاندارد آزمایش ($1,5, 1 \text{ Kw}/m^2$ AM و دمای سلول 25 درجه سانتی

گراد)

Manufacturer	Kyocera	Sharp	BP	Uni-Solar	Shell
Model	KC-120-1	NE-Q5E2U	2150S	Uni-64	ST40
Material	Multicrystal	Polycrystal	Monocrystal	Triple junction a-Si	CIS-thin film
Number of crlls n	36	72	72		42
Rated Power $P_{DC,STC}$	120	165	150	64	40
Voltage at max power (V)	16,9	34,6	34	16,5	16,6
Current at rated power (A)	7,1	4,77	4,45	3,88	2,41
Open-cricuit voltage V_{OC} (V)	21,5	43,1	42,8	23,8	23,3
Short-circuit current I_{SC} (A)	7,45	5,46	4,75	4,80	2,68
Length (mm/in.)	1425/56,1	1575/62,05	1587/62,5	1366/53,78	1293/50,9
Width (mm/in.)	652/25,7	826/32,44	790/31,1	741/29,18	329/12,9
Depth (mm/in.)	52/2,0	46/1,81	50/1,97	31,8/1,25	54/2,1
Weight (Kg/lb)	11,9/26,3	17/37,5	15,4/34	9,2/20,2	14,8/32,6
Module efficiency	12,9%	12,7%	12,0%	6,3%	9,4%

از آنجائیکه منحنی PV I-V با تغییر مقدار تابش و دمای سلول‌ها انتقال پیدا می‌کند، شرایط استاندارد آزمایش (STC) جهت امکان مقایسه یک ماژول با ماژول دیگر اعمال می‌شوند. این شرایط آزمایش شامل مقدار تابش خورشیدی $1 \text{ Kw}/\text{m}^2$ (1sun) با توزیع طیفی نشان داده شده در شکل 8-24 متناظر با طریب توده هوا $1/5(\text{am}^{137})$ است. دمای استاندارد سلول برای آزمایش 25 درجه سانتی‌گراد است (توجه به این نکته مهم است که دمای 25 درجه سلول دمای محیط نمی‌باشد). سازندگان همواره داده‌های عملکرد را تحت این شرایط عملیاتی ارائه می‌نمایند، نمونه‌هایی از این موارد در جدول 8-2 نشان داده شده است. پارامتر کلیدی ماژول توان نامی آن است، که به ما کمک می‌کند که به یاد داشته باشیم که این یک توان dc اندازه‌گیری شده تحت شرایط استاندارد آزمایش است که در جدول 8-2 بصورت $P_{\text{DC.STC}}$ نشان داده شده است.

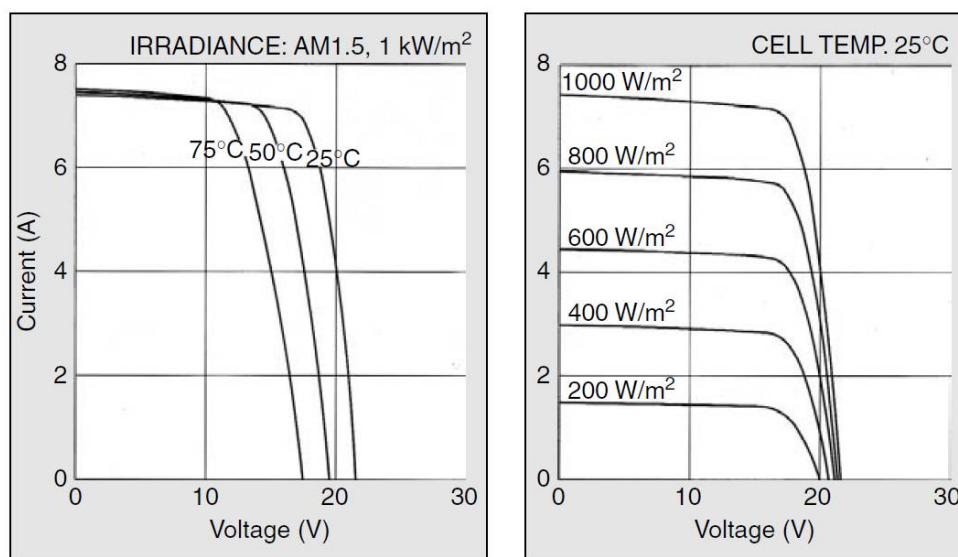


شکل ۸-۲۴ طیف خورشیدی در $\text{am}1/5$

7-8- اثرات دما و تابش بر منحنی های I-V

^{۱۳۷} Air mass rato

سازندگان اغلب منحنی های $I-V$ را ارائه می دهند که نشان دهنده چگونگی انتقال در نتیجه تغییرات دما و تابش می باشد. شکل 8-25 نشان دهنده مثال هایی برای ماژول سیلیکونی چند کریستالی Kyocera 120-W شرح داده شده در جدول 8-2 می باشد. توجه کنید زمانیکه تابش کم می شود، جریان اتصال کوتاه با نسبت مستقیم کاهش می یابد. کاهش نیمی از جریان منجر به کاهش نیمی از I_{SC} خواهد شد. کاهش تابش همچنین باعث کاهش V_{OC} می شود، اما از رابطه لگاریتمی که با تغییرات نسبتاً کم در V_{OC} ایجاد می شود پیروی نمی کند.



شکل 8-25 نمودارهای ولتاژ جریان

همانطور که در شکل 8-25 مشاهده می شود، با افزایش دمای سلول، ولتاژ مدار باز بطور قابل توجهی کاهش می یابد در حالیکه جریان اتصال کوتاه به مقدار کمی افزایش پیدا می کند. سیستم های PV نیز در روزهای سرد عملکرد بهتری دارند. برای سلول های سیلیکونی کریستالی، مقدار V_{OC} در حدود 0/37 درصد با هر درجه سلسیوس افزایش دما کاهش می یابد و این مقدار برای I_{SC} تقریباً برابر با 0/05 درصد افزایش است. براینده خالص در زمان افزایش دمای سلول این است که MPP تا مقدار کمی به بالا و به سمت چپ با کاهش در حداکثر توان در دسترس همراه با تغییر دمای سلول حرکت می کند، به سادگی باید واضح باشد که دما باید در هر برآوردی از عملکرد ماژول گنجانده شود.

تغییرات در دمای سلول تنها به خاطر تغییرات در دمای محیط نمی‌باشد، بلکه تغییر تابش نیز مقوله مهمی است. از آنجائیکه تنها کسری از تابش که ماژول را گرم می‌کند به برق تبدیل شده و انتقال داده می‌شود، مقدار زیادی از این انرژی ساطع شده جذب شده و به گرما تبدیل می‌گردد. جهت کمک به طراحان سیستم برای محاسبه تغییرات در عملکرد سلول با تغییرات دما، اغلب شاخصی به نام $NOCT^{138}$ را تهیه می‌کنند، که معرف دمای نامی بهره‌برداری سلول است. شاخص $NOCT$ دمای سلول در یک ماژول است زمانیکه دمای محیط 20 درجه، تابش خورشیدی 0/8 کیلو وات بر متر مربع، و سرعت باد 1 متر بر ثانیه است. برای محاسبه سایر شرایط محیط، عبارت زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20}{0.8} \right) \cdot S \quad (19-8)$$

که در آن T_{cell} دمای سلول، T_{amb} دمای محیط، و S تابش خورشید است.

مثال 5-8 تاثیر دمای سلول بر توان ماژول PV. دمای سلول، ولتاژ مدار باز، و حداکثر خروجی توان را برای یک ماژول 150 – W BP2150s تحت شرایط تابش 1 sun و دمای محیط 30 درجه سانتی‌گراد تخمین بزنید. شاخص $NOCT$ ماژول برابر است با 47 درجه سانتی‌گراد.

راه حل. با استفاده از رابطه (19-8) با $s = 1 \text{ Kw}/m^2$ ، دمای تقریبی سلول برابر است با:

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20}{0.8} \right) \cdot S = 30 + \left(\frac{47 - 20}{0.8} \right) \cdot 1 = 64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

از داده‌های جدول 2-8 برای این ماژول در دمای استاندارد 25 درجه، V_{OC} برابر است با 42/8 ولت. از آنجائیکه V_{OC} در حدود 0/37 درصد درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد، V_{OC} جدید برابر است با:

^{۱۳۸} Nominal Operting Cell Temperature

$$V_{OC} = 42,18 [1 - 0,0037 (64 - 25)] = 36,7 \text{ V}$$

با انتظار کاهش 0/5 درصد بر درجه سانتی‌گراد توان ماکزیمم، این ماژول 150 وات توان ماکزیمم را بصورت زیر انتقال خواهد داد:

$$P_{max} = 150W \cdot [1 - 0,005 (64-25)] = 121W$$

که نسبتاً کاهش قابل توجه 19 درصدی از توان نامی است.

زمانیکه شاخص NOCT ارائه نشده است، رویکرد دیگری برای برآورد کردن دمای سلول براساس رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$T_{cell} = T_{amb} + \gamma \left(\frac{Insolation}{1 \text{ Kw}/m^2} \right) \quad (20-8)$$

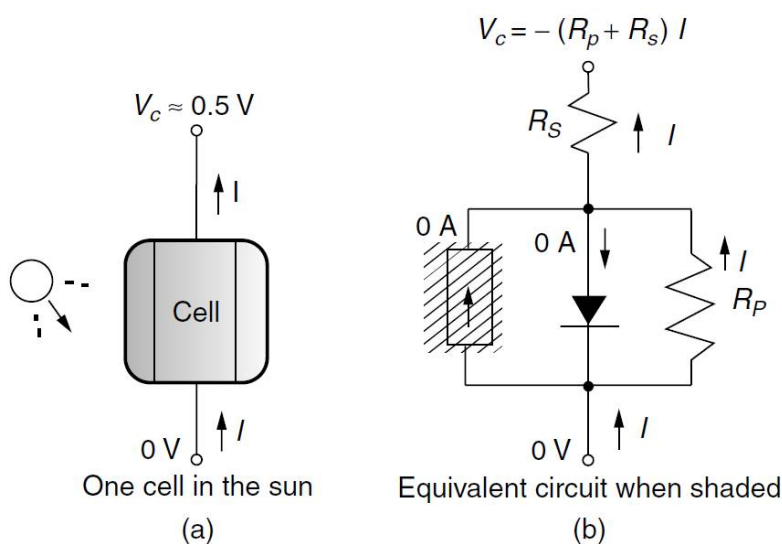
که در آن γ یک ضریب تناسبی که به سرعت باد و تهویه مناسب ماژول‌های نصب شده بستگی دارد. مقادیر عمومی γ بین 25 تا 35 درجه سانتی‌گراد است؛ که در تابش خورشیدی، سلول 25 تا 35 درجه گرمتر از محیط اطرافش است.

8-8- اثرات سایه‌ای بر منحنی‌های I-V

خروجی یک ماژول PV زمانیکه بخشی کوچکی از آن سایه باشد بطور چشمگیر کاهش می‌یابد. در صورت عدم تلاش‌های لازم برای جبران مشکل سایه، حتی یک سلول در معرض سایه در زنجیره بلند سلول‌ها می‌تواند توان خروجی را تا نصف کاهش دهد. دیودهای خارجی¹³⁹، که توسط سازنده PV و یا طراح سیستم بصورت هدف دار اضافه شده اند می‌توانند به حفظ عملکرد ماژول‌های PV کمک نمایند. هدف اصلی این دیودها کاهش اثرات

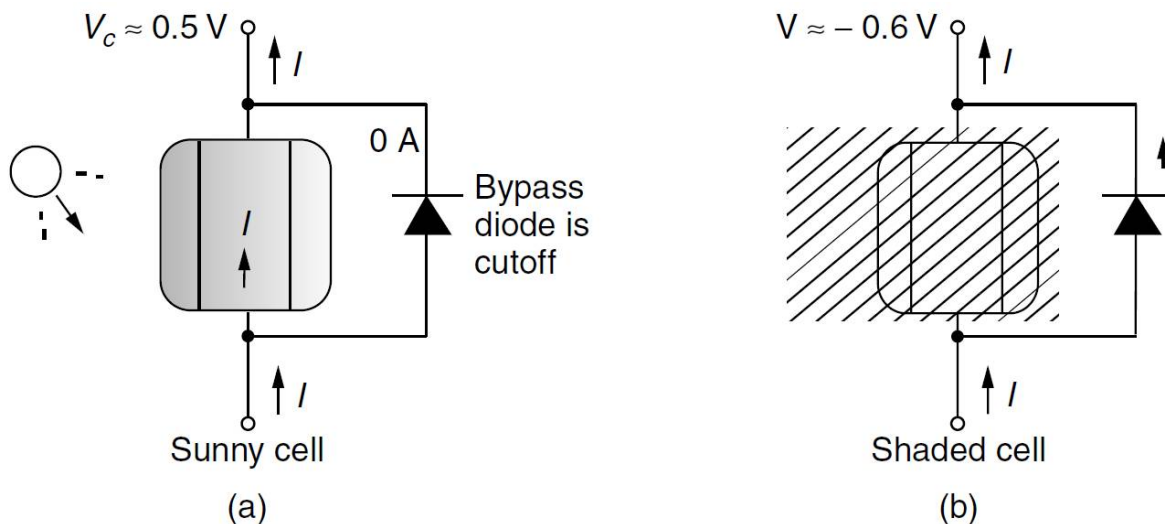
¹³⁹ External diodes

سایه‌ای بر منحنی های $I-V$ است. این دیودها معمولاً بصورت موازی با ماژول‌ها یا بلوک‌های سلول در یک ماژول اضافه می‌شوند. در نور کامل یک سلول ممکن است در حدود 0/5 ولت به ولتاژ خروجی ماژول اضافه نماید اما وقتی سلول در سایه قرار می‌گیرد داری افت ولتاژ زیاد خواهد بود (شکل 8-26). اما هنگامیکه یک سلول خورشیدی در نور قرار می‌گیرد افزایش ولتاژ در امتداد سلول وجود دارد بنابر این دیود جانبی¹⁴⁰ قطع شده و هیچ جریانی شکل نمی‌گیرد. این کار در صورت عدم وجود دیود هم انجام می‌پذیرد. با این حال زمانی که سلول خورشیدی در سایه قرار می‌گیرد ممکن است افت ولتاژ رخ دهد و این عمل باعث روشن شدن دیود جانبی شود و گردش جریان در امتداد دیود را انتقال می‌دهد (شکل 8-27). در ماژول‌های واقعی افزودن دیودهای جانبی واقعی برای هر سلول غیر عملی می‌باشد اما سازندگان حداقل یکی از دیودهای جانبی را در اطراف ماژول برای حمایت از آرایه‌ها فراهم می‌کنند و گاهی دیودهای زیاد در اطراف گروه سلولها در یک ماژول قرار می‌دهند.



شکل 8-26 وضعیت سلول در خورشید و سایه

¹⁴⁰ bypass diode



شکل 8-27 تاثیر دیود جانبی

9-8 راندمان سلول خورشیدی

راندمان سلول خورشیدی عبارت است از درصد انرژی تبدیل شده به الکتریسیته (در نتیجه تبدیل انرژی تابشی جذب شده به انرژی الکتریکی) در هنگام اتصال سلول خورشیدی به یک مدار الکتریکی. راندمان سلول های خورشیدی از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$\eta = \frac{P_m}{E \times A_c} \quad (21-8)$$

در این رابطه، P_m توان حداکثر، E شدت تابش نور ورودی تحت شرایط استاندارد و A_c مساحت سطح سلول خورشیدی می باشد.

بعضی مقالات فاکتور دیگر در تبیین رفتار سلول های خورشیدی استفاده میکنند که فاکتور کفایت می باشد که از رابطه زیر به دست می آید:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{\eta \times E \times A_c}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (22-8)$$