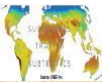


CHAPTER 7

THE SOLAR RESOURCE



THE SOLAR RESOURCE

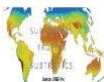
7.1 THE SOLAR SPECTRUM

طول موجهایی که توسط جسم سیاه منتشر می شوند با توجه به دمای آن توسط قانون پلانک توصیف می شود

$$E_{\lambda} = \frac{3.74 \times 10^8}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{14,400}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

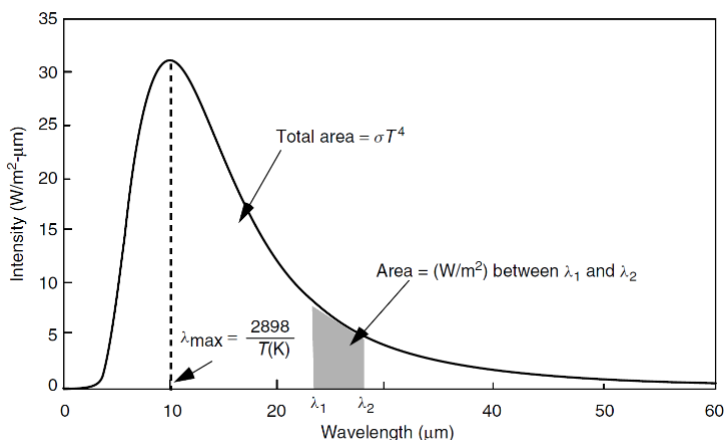
E_{λ} قدرت صادره ی هر سطح واحد یک جسم سیاه $(W/m^2 \mu m)$ می باشد.

T دمای مطلق جسم بر حسب کلوین و λ طول موج بر حسب میکرون می باشند.



THE SOLAR RESOURCE

شکل ۷-۱ زمین را به عنوان یک جسم سیاه (15c) 288k که باعث تولید طیف نوری شده را نشان می دهد



شکل ۷-۱ توان طیف منتشره از جسم سیاه با دمای ۲۸۸ k



THE SOLAR RESOURCE

ناحیه ای که زیر منحنی پلانک و بین دو طول موج قرار دارد نیرویی را نشان می دهد که بین دو طول موج منتشر می شود. بنابراین تمام نیروی تابشی در ناحیه ی اصلی زیر منحنی قرار می گیرد. این ناحیه ی اصلی به راحتی توسط قانون تشعشع استفان بولتزمن بیان می شود

$$E = A\sigma T^4$$

E میزان کلی انتشار جسم سیاه بر حسب ولت است .

σ ثابت استفان بولتزمن می باشد که مقدار آن عبارت است از $5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{-k}^4$

T دمای مطلق جسم سیاه بر حسب کلوین و A سطح جسم سیاه بر حسب m^2 می باشند

$$\lambda_{\max} (\mu\text{m}) = \frac{2898}{T (\text{K})} \quad \text{حداکثر طول موج در چه طیفی}$$

λ_{\max} طول موج بر حسب میکرون (μm)

T دما بر حسب کلوین می باشد

مثال ۷-۱: طیف زمین

زمین را به عنوان یک جسم سیاه با متوسط دمای سطحی 15°C و ناحیه (area) برابر با 5.1×10^{14} در نظر بگیرید. سرعت تابش انرژی توسط زمین و طول موج با توان حداکثر را بیابید سپس این طول موج را با طول موج جسم سیاه 5800K (خورشید) مقایسه کنید.

راه حل: با استفاده از معادله (۷-۲): انرژی ساطع شده توسط زمین عبارت است از:

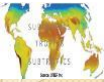
$$E = \sigma AT^4 = (5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4) \times (5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2) \times (15 + 273 \text{ K})^4 \\ = 2.0 \times 10^{17} \text{ w}$$

و با استفاده از معادله (۷-۳) طول موجی با توان حداکثر می شود:

$$\lambda_{\text{max}}(\text{earth}) = \frac{2898}{T(\text{K})} = \frac{2898}{288} = 10 \mu\text{m}$$

و برای خورشید 5800K می شود:

$$\lambda_{\text{max}}(\text{sun}) = \frac{2898}{5800} = 0.5 \mu\text{m}$$



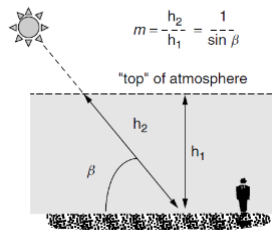
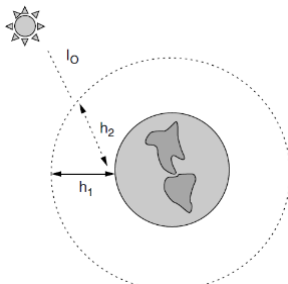
THE SOLAR RESOURCE

h_2 طول مسیری می باشد که پرتوهای خورشیدی باید در اتمسفر طی کنند. h_1 حداقل طول مسیر ممکنه می باشد یعنی زمانی که خورشید مستقیماً بالای سر قرار دارد. وقتی h_1 , h_2 را بر هر تقسیم کنیم حاصل m یعنی نسبت توده ی هوایی می شود

$$\text{Air mass ratio } m = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\sin \beta}$$

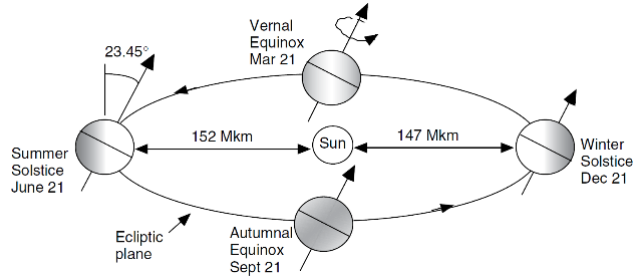
β زاویه ی دهانه ی خورشید می باشد

بنابراین، نسبت توده ی هوایی ۱ (AM1) بدین معناست که خورشید مستقیماً بالای سر می باشد. همچنین AM0 بدین معناست که اتمسفری وجود ندارد، یعنی اینکه طیف خورشیدی خارجی (ماوراء الطبیعی) است.





THE SOLAR RESOURCE



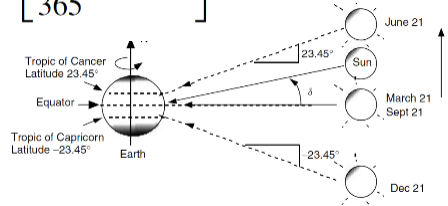
شکل ۷-۵ زاویه چرخش محور زمین با در نظر گرفتن تغییرات تابش خورشید که فصل های سال را بوجود می آورد.



THE SOLAR RESOURCE

زاویه ی بین سطح استوا با خطی که از مرکز خورشید به مرکز زمین رسم می شود ، زاویه ی میل خورشیدی (δ) نامیده می شود. زاویه ی میل خورشیدی بین منتهای درجه های 23.45° (+و-) تغییر می کند

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right]$$



یک تصویر انتخالی با یک زمین ثابت و خورشیدی که به سمت بالا و پایین حرکت می کند. زاویه ی بین خورشید و استوا ، زاویه ی میل خورشیدی (δ) نامیده می شود.

TABLE 7.2 Solar Declination δ for the 21st Day of Each Month (degrees)

Month:	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
δ :	-20.1	-11.2	0.0	11.6	20.1	23.4	20.4	11.8	0.0	-11.8	-20.4	-23.4

THE SOLAR RESOURCE

ترسیم یک سیستم زمین - خورشید در تشخیص یک زاویه ی خورشیدی مهم به نام **زاویه دهانه ی β_N** خورشید در ظهر خورشیدی کمک می کند. این زاویه ی دهانه ما بین خورشید و افق محلی ، مستقیماً در زیر خورشید قرار دارد. با توجه به شکل رابطه ی زیر حاصل می شود:

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta$$

L عرض جغرافیایی محل می باشد

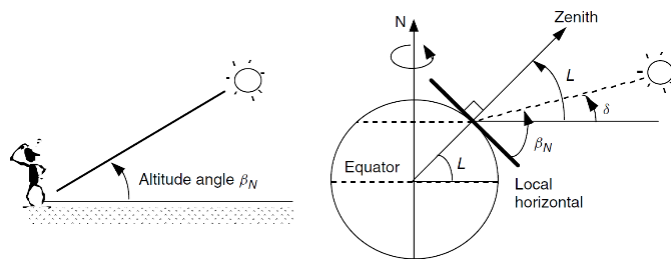


Figure 7.9 The altitude angle of the sun at solar noon.

مثال ۷-۲ زاویه ی شیب یک ماژول PV: زاویه شیب مطلوب برای یک ماژول فتوولتائیک رو به جنوب در توکسن (عرض جغرافیایی ۳۲.۱ درجه) و در ظهر خورشیدی در روز یکم مارس را پیدا نمایید.
راه حل: با توجه به جدول ۷-۱، یکم مارس شصتمین روز سال می باشد. بنابراین زاویه ی میل خورشیدی با توجه به معادله ی (۷-۶) می شود

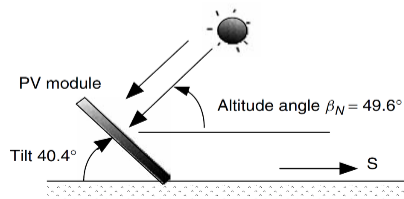
$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (60 - 81) \right] = -8.3^\circ$$

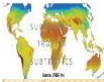
which, from (7.7), makes the altitude angle of the sun equal to

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta = 90 - 32.1 - 8.3 = 49.6^\circ$$

The tilt angle that would make the sun's rays perpendicular to the module at noon would therefore be

$$\text{Tilt} = 90 - \beta_N = 90 - 49.6 = 40.4^\circ$$



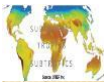
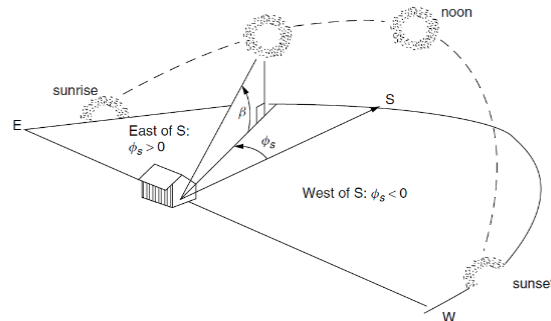


وضع خورشیدی در هر زمان از روز

با استفاده از زاویه ی دهانه ی β و زاویه گرای خورشید ϕ_s می توان موقعیت خورشید را در هر زمان از روز توصیف نمود

برای سهولت کار ، در هنگام صبح که خورشید در شرق است زاویه گرا مثبت می باشد و در هنگام عصر که خورشید در مغرب قرار دارد زاویه گرا منفی می باشد

زاویه گرا و زاویه دهانه ی خورشید به عرض جغرافیایی ، شماره روز و مهمتر از آن به زمان روز بستگی دارد



دو معادله ی زیر در محاسبه ی زاویه گرا و زاویه های دهانه ی به ما کمک می کنند

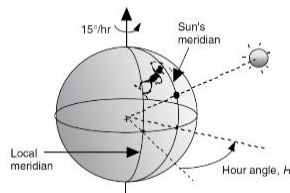
$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta$$

$$\sin \phi_s = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta}$$

قابل ذکر است که این معادله با یک کمیت به نام زاویه ساعتی (H) بیان می شود. درجه ای که زمین باید قبل از آنکه خورشید مستقیماً بر نصف النهار محلی (خط طول جغرافیایی) قرار گیرد به دور محور بچرخد **زاویه ی ساعتی** می نامند

اگر زمین در بیست و چهار ساعت ۳۶۰ درجه یا به عبارتی 150h به دور محور خود بچرخد ، در آن صورت زاویه ی ساعتی به شکل زیر می باشد.

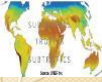
$$\text{Hour angle } H = \left(\frac{15^\circ}{\text{hour}} \right) \cdot (\text{hours before solar noon})$$



بنابراین ، H زاویه ی ساعتی در ۱۱:۰۰ صبح به ساعت شمسی 15°+ می باشد (یعنی لازم است قبل از ظهر خورشیدی ، زمین ۱۵ درجه L به عبارت یک ساعت بیشتر به دور خود بچرخد) . زاویه ی ساعتی بعد از ظهر منفی می باشد. برای مثال در ساعت ۲:۰۰ بعد از ظهر به ساعت شمسی H = -30 درجه است

از آنجا که معکوس یک سینوس مهم است ، $\sin x = \sin (180-x)$ ، پس نیاز به یک آزمایشی داریم تا مشخص کند که آیا زاویه گرا بیشتر یا کمتر از ۹۰ درجه از جنوب دور می باشد ، چنین آزمایشی به شرح زیر می باشد

$$\text{if } \cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L}, \quad \text{then } |\phi_s| \leq 90^\circ; \quad \text{otherwise } |\phi_s| > 90^\circ$$



مثال ۳-۷ خورشید کجاست؟

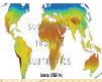
زاویه دهانه و زاویه گرای خورشید در ساعت ۳:۰۰ بعد از ظهر به ساعت خورشیدی در بولدر، کلرادو (عرض جغرافیایی ۴۰ درجه) روی انقلاب تابستانی را بیابید؟

راه حل: از آنجا که در انقلاب تابستانی می باشد، ما می دانیم که زاویه میل خورشیدی $\delta = 23/45^\circ$ می باشد. بنابراین 3:00p.m، سه ساعت بعد از، ظهر خورشیدی می باشد.

$$H = \left(\frac{15^\circ}{\text{h}} \right) \cdot (\text{hours before solar noon}) = \frac{15^\circ}{\text{h}} \cdot (-3 \text{ h}) = -45^\circ$$

Using (7.8), the altitude angle is

$$\begin{aligned} \sin \beta &= \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \\ &= \cos 40^\circ \cos 23.45^\circ \cos(-45^\circ) + \sin 40^\circ \sin 23.45^\circ = 0.7527 \\ \beta &= \sin^{-1}(0.7527) = 48.8^\circ \end{aligned}$$



THE SOLAR RESOURCE

From (7.9) the sine of the azimuth angle is

$$\begin{aligned} \sin \phi_S &= \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta} \\ &= \frac{\cos 23.45^\circ \cdot \sin(-45^\circ)}{\cos 48.8^\circ} = -0.9848 \end{aligned}$$

But the arcsine is ambiguous and two possibilities exist:

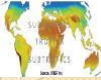
$$\begin{aligned} \phi_S &= \sin^{-1}(-0.9848) = -80^\circ \quad (80^\circ \text{ west of south}) \\ \text{or } \phi_S &= 180 - (-80) = 260^\circ \quad (100^\circ \text{ west of south}) \end{aligned}$$

To decide which of these two options is correct, we apply (7.11):

$$\cos H = \cos(-45^\circ) = 0.707 \quad \text{and} \quad \frac{\tan \delta}{\tan L} = \frac{\tan 23.45^\circ}{\tan 40^\circ} = 0.517$$

Since $\cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L}$ we conclude that the azimuth angle is

$$\phi_S = -80^\circ \quad (80^\circ \text{ west of south})$$



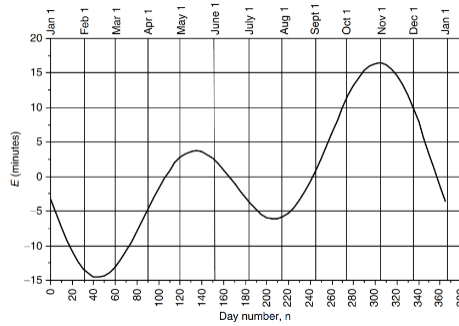
به دلیل حرکت های زمین در مدار خود، اختلاف میان یک روز بیست و چهار ساعته و یک روز خورشیدی با پیروی از عبارتی که به عنوان معادله زمان E شناخته شده، تغییر می کند

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (\text{minutes})$$

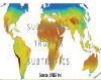
$$B = \frac{360}{364}(n - 81) \quad (\text{degrees})$$

n عدد روز است

رابطه اصلاح های زمانی برای زاویه کجی زمین و مدار بیضوی زمین



$$\text{زمان خورشیدی} (ST) = \text{زمان ساعتی} (CT) + \frac{4 \text{ min}}{\text{degree}} (\text{طول جغرافیایی محل} - \text{نصف النهار زمان محلی})^\circ + E(\text{min})$$



Example 7.5 Solar Time to Local Time.

پیدا کنید زمان روشنی روز شرقی برای خورشید نیمروزی در بوستون (طول جغرافیایی $71.1^\circ W$) در روز یکم جولای.

حل: روز یکم جولای برابر با $n = 182$ می باشد. با استفاده از روابط برای اصلاح زمان محلی داریم
Boston

$$B = \frac{360}{364}(n - 81) = \frac{360}{364}(182 - 81) = 99.89^\circ$$

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B$$

$$= 9.87 \sin[2 \cdot (99.89)] - 7.53 \cos(99.89) - 1.5 \sin(99.89) = -3.5 \text{ min}$$

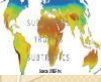
For Boston at longitude 71.7° in the Eastern Time Zone with local time meridian 75°

$$CT = ST - 4(\text{min}/^\circ)(\text{Local time meridian} - \text{Local longitude}) - E(\text{min})$$

$$CT = 12:00 - 4(75 - 71.1) - (-3.5) = 12:00 - 12.1 \text{ min}$$

$$= 11:47.9 \text{ A.M. EST}$$

To adjust for Daylight Savings Time add 1 h, so solar noon will be at about 12:48 P.M. EDT.



طلوع و غروب افتاب

در طلوع و غروب خورشید زاویه دهانیه β ، برابر با صفر است بنابراین می توانیم بنویسیم

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta = 0 \quad (7.15)$$

$$\cos H = -\frac{\sin L \sin \delta}{\cos L \cos \delta} = -\tan L \tan \delta \quad (7.16)$$

Solving for the hour angle at sunrise, H_{SR} , gives

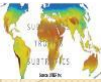
$$H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) \quad (+ \text{ for sunrise}) \quad (7.17)$$

به علت اینکه زمین هر یک ساعت ۱۵ درجه می چرخد، می توان زاویه ساعتی را به زمان طلوع و یا غروب با استفاده از رابطه زیر بدست آورد

$$\text{Sunrise (geometric)} = 12:00 - \frac{H_{SR}}{15^\circ/h}$$

$$Q = \frac{3.467}{\cos L \cos \delta \sin H_{SR}}$$

ضریب تصحیح :
می بایستی از طلوع هندسی کم شود.
می بایستی به غروب هندسی اضافه گردد



Example 7.6 Sunrise in Boston.

پیدا کنید طلوع در بوستون در چه زمانی رخ می دهد. (عرض جغرافیایی 42.3°) در روز یکم جولای و همچنین غروب خورشید قراردادی را پیدا کنید. عدد روز $n=182$ می باشد.

Solution. From (7.6), the solar declination is

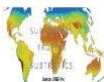
$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (182 - 81) \right] = 23.1^\circ$$

From (7.17), the hour angle at sunrise is

$$H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) = \cos^{-1}(-\tan 42.3^\circ \tan 23.1^\circ) = 112.86^\circ$$

From (7.18) solar time of geometric sunrise is

$$\begin{aligned} \text{Sunrise (geometric)} &= 12:00 - \frac{H_{SR}}{15^\circ/h} \\ &= 12:00 - \frac{112.86^\circ}{15^\circ/h} = 12:00 - 7.524 \text{ h} \\ &= 4:28.6 \text{ A.M. (solar time)} \end{aligned}$$



THE SOLAR RESOURCE

برای اصلاح شکست و تعریف لبه بالایی برای طلوع داریم

$$Q = \frac{3.467}{\cos L \cos \delta \sin H_{SR}} \text{ (min)}$$

$$= \frac{3.467}{\cos 42.3 \cos 23.1^\circ \sin 112.86^\circ} = 5.5 \text{ min}$$

The upper limb will appear 5.5 minutes sooner than our original geometric calculation indicated, so

$$\text{Sunrise} = 4:28.6 \text{ A.M.} - 5.5 \text{ min} = 4:23.1 \text{ A.M. (solar time)}$$

From Example 7.5, on this date in Boston, local clock time is 12.1 min earlier than solar time, so sunrise will be at

$$\text{Sunrise (upper limb)} = 4:23.1 - 12.1 = 4:11 \text{ A.M. Eastern Standard Time}$$

Similarly, geometric sunset is 7.524 h after solar noon, or 7:31.4 P.M. solar time. The upper limb will drop below the horizon 5.5 minutes later. Then adjusting for the 12.1 minutes difference between Boston time and solar time gives

$$\text{Sunset (upper limb)} = 7:31.4 + (5.5 - 12.1) \text{ min} = 7:24.8 \text{ P.M. EST}$$

جعبه ۱-۷. خلاصه ای از زوایای خورشیدی

δ	زاویه تمایل خورشیدی
n	عدد روز
L	عرض جغرافیایی
β	زاویه دهانیه خورشیدی
β_N	زاویه نیمروز خورشیدی
H	زاویه ساعتی
H_{sr}	زاویه ساعتی طلوع
ϕ	زاویه گرای خورشید (قبل از نیمروز خورشیدی +، بعد از آن -)
ϕ_c	زاویه گرای کلکتور (شرق از جنوب +، غرب از جنوب -) علامت ها در نیمکره جنوبی مخالف هستند
ST	زمان خورشیدی
CT	زمان محلی
E	معادله زمان
Q	اصلاح برای شکست و شعاع دایره ای در طلوع/غروب
Σ	زاویه انحراف کلکتور
θ	زاویه تابش میان خورشید و سطح کلکتور

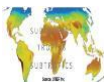


TABLE 7.6 Optical Depth k , Apparent Extraterrestrial Flux A , and the Sky Diffuse Factor C for the 21st Day of Each Month

جدول ۶-۷. عمق نوری K ، سیلان خورشیدی خارجی ظاهری (شار قابل روئت در خارج از جو) A ، ضریب انتشار آسمان C ، برای بیست و یکمین روز هر ماه

Month:	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
A (W/m^2):	1230	1215	1186	1136	1104	1088	1085	1107	1151	1192	1221	1233
k :	0.142	0.144	0.156	0.180	0.196	0.205	0.207	0.201	0.177	0.160	0.149	0.142
C :	0.058	0.060	0.071	0.097	0.121	0.134	0.136	0.122	0.092	0.073	0.063	0.057

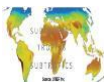
$$A = 1160 + 75 \sin \left[\frac{360}{365}(n - 275) \right] \quad \text{where again } n \text{ is the day number.}$$

$$k = 0.174 + 0.035 \sin \left[\frac{360}{365}(n - 100) \right]$$

$$I_B = Ae^{-km} \quad \text{بخشی از پرتوی تشعشعی است که به سطح زمین می رسد}$$

$$\text{Air mass ratio} \quad m = \frac{1}{\sin \beta}$$

نسبت توده هوایی β زاویه دهانیه خورشید



مثال ۸-۷. تشعشع پرتوی مستقیم بر روی سطح زمین

پیدا کنید تشعشع پرتوی مستقیم خورشید نرمال به اشعه های خورشید نیمروزی در یک آسمان صاف در آتلانتا (عرض جغرافیایی 33.4°) در روز بیست و یکم می.

حل. عدد روز برای بیست و یکم می برابر با ۱۴۱ می باشد. اشار قابل روئت خارج از جو، A برابر است با:

$$A = 1160 + 75 \sin \left[\frac{360}{365}(n - 275) \right] = 1160 + 75 \sin \left[\frac{360}{365}(141 - 275) \right] \\ = 1104 \text{ W/m}^2$$

(which agrees with Table 7.6).

From (7.23), the optical depth is

$$k = 0.174 + 0.035 \sin \left[\frac{360}{365}(n - 100) \right] \\ = 0.174 + 0.035 \sin \left[\frac{360}{365}(141 - 100) \right] = 0.197$$

(which is very close to the value given in Table 7.6).

From Table 7.2, on May 21 solar declination is 20.1° , so from (7.7) the altitude angle of the sun at solar noon is

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta = 90 - 33.7 + 20.1 = 76.4^\circ$$

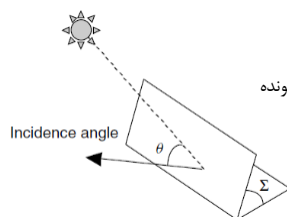
The air mass ratio (7.4) is

$$m = \frac{1}{\sin \beta} = \frac{1}{\sin(76.4^\circ)} = 1.029$$

Finally, using (7.21) the predicted value of clear sky beam radiation at the earth's surface is

$$I_B = Ae^{-km} = 1104 e^{-0.197 \times 1.029} = 902 \text{ W/m}^2$$

تبدیل تشعشع پرتوی مستقیم I_B به پرتوی در معرض خورشید قرار گرفتگی یک سطح کلکتور I_{BC} ، یک تابع ساده از زاویه θ میان خط کشیده شده به سطح کلکتور و پرتوی تشعشعی است

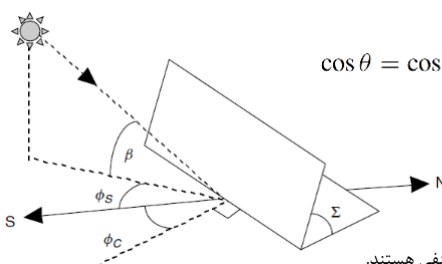


زاویه تابش θ میان سطح یک کلکتور معمولی و پرتوی مستقیم خورشیدی وارد شونده

$$I_{BC} = I_B \cos \theta$$

برای مورد خاصی از پرتوی در معرض خورشید قرار گرفتگی روی یک سطح افقی

$$I_{BH} = I_B \cos(90^\circ - \beta) = I_B \sin \beta$$



$$\cos \theta = \cos \beta \cos(\phi_S - \phi_C) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma$$

زاویه گرای کلکتور ϕ_C

زاویه انحراف Σ

زاویه گرای خورشید ϕ_S

زاویه دهانیه خورشید β

گرای زوایا در جهت جنوب شرقی مثبت و در جنوب غربی منفی هستند.



مثال ۹-۷ پرتو در معرض خورشید قرار گرفتگی روی یک کلکتور.

در مثال ۷-۸ در خورشید نیمروزی در آتلانتا (عرض جغرافیایی $33^\circ 7'$) در روز بیست و یکم می زاویه عرض جغرافیایی پیدا شده خورشید 76.4° بود و پرتوی در معرض خورشید قرار گرفتگی پیدا شده در آسمان صاف 902 وات بر متر مربع بود.

پیدا کنید پرتوی در معرض خورشید قرار گرفتگی در همان زمان روی یک کلکتور که به 2° جنوبی بر می خورد اگر زاویه Σ در 54° باشد.

حل. با استفاده از ۷-۱۶ کسینوس زاویه تلاقی برابر است با:

Solution. Using (7.26), the cosine of the incidence angle is

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \cos \beta \cos(\phi_S - \phi_C) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \\ &= \cos 76.4^\circ \cos(0 - 20^\circ) \sin 52^\circ + \sin 76.4^\circ \cos 52^\circ = 0.7725 \end{aligned}$$

From (7.24), the beam radiation on the collector is

$$I_{BC} = I_B \cos \theta = 902 \text{ W/m}^2 \cdot 0.7725 = 697 \text{ W/m}^2$$

تشعشع پراکنده

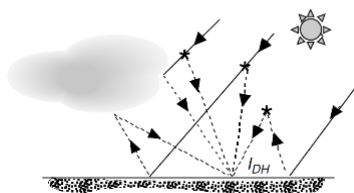
معرض خورشید قرار گرفتنی پراکنده روی یک سطح افقی I_{BH} متناسب است با تشعشع پرتوی مستقیم I_B بدون اینکه مهم باشد خورشید در کجای آسمان قرار دارد و برابر است با

$$I_{DH} = C I_B$$

C ضریب انتشار آسمان

$$C = 0.095 + 0.04 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 100) \right]$$

تشعشع نفوذی می تواند توسط ذرات اتمسفر و رطوبت پراکنده شود یا از ابرها منعکس گردد



انرژی پراکنده برخوردی با کلکتور برابر است با

$$I_{DC} = I_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = C I_B \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right)$$

مثال ۷-۱۰ تشعشع پراکنده بر روی کلکتور.

مثال ۹-۶ را ادامه دهید و تشعشع پراکنده را بر روی پانل محاسبه کنید. یادآوری میشود که این کار در وسط روز آفتابی در آتلانتا و در تاریخ ۲۱ ماه می (May)، ۱۴۱ امین روز سال، و صفحات کلکتور با زاویه ۲۰ درجه به سمت جنوب شرقی می باشند و تا زاویه ۵۲ درجه نیز کج خواهند شد. در معرض آفتاب صاف قرار گرفتن آن نیز 902 W/m^2 می باشد.

پاسخ: از رابطه (۷-۲۸) استفاده می کنیم تا ضریب پراکندگی آسمان C مشخص شود.

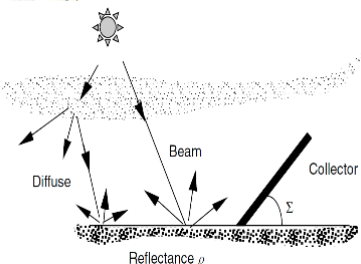
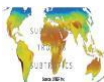
$$C = 0.095 + 0.04 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 100) \right]$$

$$C = 0.095 + 0.04 \sin \left[\frac{360}{365} (141 - 100) \right] = 0.121$$

And from (7.29), the diffuse energy striking the collector is

$$\begin{aligned} I_{DC} &= C I_B \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \\ &= 0.121 \cdot 902 \text{ W/m}^2 \left(\frac{1 + \cos 52^\circ}{2} \right) = 88 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

با اضافه نمودن در معرض آفتاب قرار گرفتن به میزان 697 W/m^2 که از مثال ۷-۹ بدست آمد، کل اشعه پراکندگی روی کلکتور را به میزان 785 W/m^2 افزایش میدهد.



پرتوهای برگشتی

مقدار رنج انعکاس زمین حدوداً ۰.۸ برای برف تازه و بالای ۰.۱ برای سطح آسفالت می باشد. معمولاً این مقدار برای زمین معمولی و علفزار حدود ۰.۲ بدست می آید. مقدار منعکس شده را می توان بعنوان شعاع افقی (I_{BH} شعاع افقی، I_{DH} پراکندگی اضافی) برابر انعکاس زمین ρ در نظر گرفت. باقیمانده انرژی منعکس شده از زمین که در میان راه بوسیله کالکتور جذب می شود بستگی به شیب پانل Σ دارد، در نتیجه معادله زیر پرتو برگشتی موثر کالکتور I_{RC} را نشان می دهد.

$$I_{RC} = \rho(I_{BH} + I_{DH}) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right)$$

پرتو برگشتی بر روی کالکتور

$$I_{RC} = \rho I_B (\sin \beta + C) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right)$$

مثال ۷-۱۱: پرتو برگشتی درون کالکتور.

مثال ۷-۹ و ۷-۱۰ را ادامه دهید تا در صورتیکه انعکاس سطح در جلوی پانل ۰.۲ باشد پرتو برگشتی روی پانل را بدست آورید. یادآوری می شود که روز ۲۱ ماه می (May) و یک ظهر آفتابی در آنلانتا است و مقدار زاویه خورشید β برابر ۷۶.۴ می باشد، صفحات کالکتور با زاویه 20° به سمت جنوب شرقی می باشند. ضریب انتشار آسمان C برابر ۰.۱۲۱ می باشد و در معرض اشعه خورشید قرارگیری در آسمان روشن برابر 902 W/m^2 می باشد.

پاسخ: در معرض اشعه خورشید قرارگیری بر روی کالکتور برابر است با:

$$\begin{aligned} I_{RC} &= \rho I_B (\sin \beta + C) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \\ &= 0.2 \cdot 902 \text{ W/m}^2 (\sin 76.4^\circ + 0.121) \left(\frac{1 - \cos 52^\circ}{2} \right) = 38 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

بنابراین مجموع در معرض خورشید قرارگیری بر روی کالکتور، برابر است با

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} = 697 + 88 + 38 = 823 \text{ W/m}^2$$

که از مجموع ۸۴.۷٪ پرتو مستقیم، ۱۰.۷٪ پرتو پخش شده و ۴.۷٪ پرتو منعکس شده می باشد. واضح است که سهم پرتو منعکس شده نسبتاً کم است و غالباً در نظر گرفته نمی شود. با ترکیب معادلات سه نوع پرتو، پرتو مستقیم، پرتو پخش شده و پرتو منعکس، شده مطابق معادله زیر مجموع کلی، پرتوهای وارد شده به کالکتور، در روشن شدن بدست می آید:

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \quad (7.32)$$

$$\begin{aligned} I_C &= A e^{-km} \left[\cos \beta \cos(\phi_S - \phi_C) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma + C \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \rho (\sin \beta + C) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \right] \quad (7.33) \end{aligned}$$

سیستم های دنبال کننده

دنبال کننده ها همچنین بعنوان دنبال کننده های دو محوره نیز نامیده می شوند، که هم زاویه ارتفاع و هم زاویه جهت خورشید را دنبال می کند بطوریکه معمولاً بطور مستقیم رو به خورشید است، یا بعنوان دنبال کننده تک محوره می باشند که فقط یک زاویه را دنبال می کنند

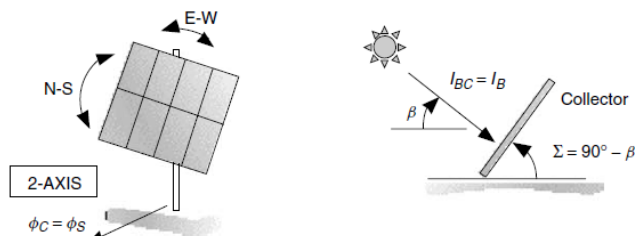


Figure 7.25 Two-axis tracking angular relationships.

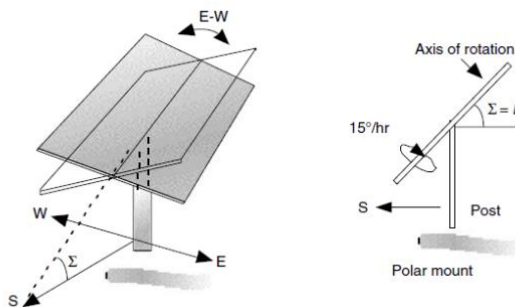
$$I_{BC} = I_B \quad \text{پرتو اشعه بر روی کالکتور در آفتابگیری کامل}$$

$$I_{DC} = C I_B \left[\frac{1 + \cos(90^\circ - \beta)}{2} \right]$$

پرتو پخش شده و منعکس شده

$$I_{RC} = \rho (I_{BH} + I_{DH}) \left[\frac{1 - \cos(90^\circ - \beta)}{2} \right]$$

One-Axis, Polar Mount:

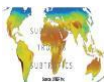


یک دنبال کننده تک محوره که دنبال کننده شرق به غرب است. یک پایه قطبی که دارای محور گردان میباشد و روبه جنوب است و زاویه آن با عرض جغرافیایی برابر است

$$I_{BC} = I_B \cos \delta$$

$$I_{DC} = C I_B \left[\frac{1 + \cos(90^\circ - \beta + \delta)}{2} \right]$$

$$I_{RC} = \rho (I_{BH} + I_{DH}) \left[\frac{1 - \cos(90^\circ - \beta + \delta)}{2} \right]$$



مثال ۷-۱۲ آفتابگیری دنبال کننده دو محوره و تک محوره.

با عرض جغرافیایی 40° آفتابگیری کالکتور در ظهر تابستان برای دنبال کننده دو محوره را با دنبال کننده تک محوره با پایه قطبی کالکتور مقایسه کنید. از انعکاس زمین صرف نظر کنید.

حل :

۱- دنبال کننده دو محوره: برای محاسبه پرتو آفتابگیری از معادله (۷-۲۱) $I_B = Ae^{-km}$ ، ما به ضریب جرم هوا m ، شار خارجی ظاهری A ، و عمق نوری k نیاز داریم. برای پیدا کردن m ما به زاویه ارتفاع خورشید نیاز داریم. با استفاده از معادله (۷-۷) با فاصله دگرگونی 23.45° :

with a solstice declination of 23.45° ,

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta = 90 - 40 + 23.45 = 73.45^\circ$$

$$\text{Air mass ratio } m = \frac{1}{\sin \beta} = \frac{1}{\sin 73.45^\circ} = 1.043$$

From Table 7.6, or Eqs. (7.22), (7.23) and (7.28), we find $A = 1088 \text{ W/m}^2$, $k = 0.205$, and $C = 0.134$. The direct beam insolation on the collector is therefore

$$I_{BC} = I_B = Ae^{-km} = 1088 (\text{W/m}^2) \cdot e^{-0.205 \times 1.043} = 879 \text{ W/m}^2$$

Using (7.35) the diffuse radiation on the collector is

$$I_{DC} = CI_B \left[\frac{1 + \cos(90^\circ - \beta)}{2} \right] \quad \text{آفتابگیری پخش شده بر روی کالکتور برابر است با}$$

$$= 0.134 \cdot 879 \left[\frac{1 + \cos(90^\circ - 73.45^\circ)}{2} \right] = 115 \text{ W/m}^2$$

The total is $I_C = I_{BC} + I_{DC} = 879 + 115 = 994 \text{ W/m}^2$



2. دنبال کننده قطبی تک محوره: سهم اشعه آفتابگیری از رابطه (۷-۳۸) بدست میاید

2. *One-Axis Polar Tracker*: The beam portion of insolation is given by (7.38)

$$I_{BC} = I_B \cos \delta = 879 \text{ W/m}^2 \cos(23.45^\circ) = 806 \text{ W/m}^2$$

The diffuse portion, using (7.39), is

سهم پخش شده با استفاده از رابطه

$$I_{DC} = CI_B \left[\frac{1 + \cos(90^\circ - \beta + \delta)}{2} \right] \quad \text{(۷.۳۹) برابر است با:}$$

$$= 0.134 \cdot 879 \text{ W/m}^2 \left[\frac{1 + \cos(90 - 73.45 + 23.45)}{2} \right] = 104 \text{ W/m}^2$$

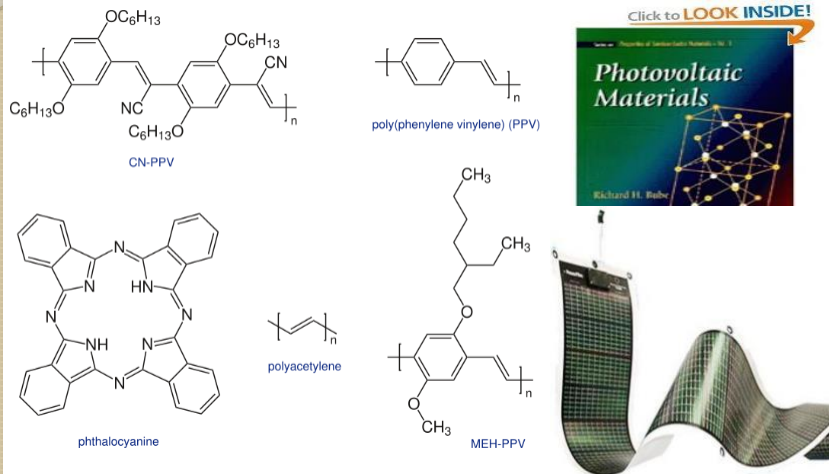
The total is $I_C = I_{BC} + I_{DC} = 806 + 104 = 910 \text{ W/m}^2$

The two-axis tracker provides 994 W/m^2 , which is only 9% higher than the single-axis mount.

دنبال کننده دو محوره مقدار 994 W/m^2 را نتیجه می دهد، که فقط ۹٪ بیشتر از پایه تک محوره است

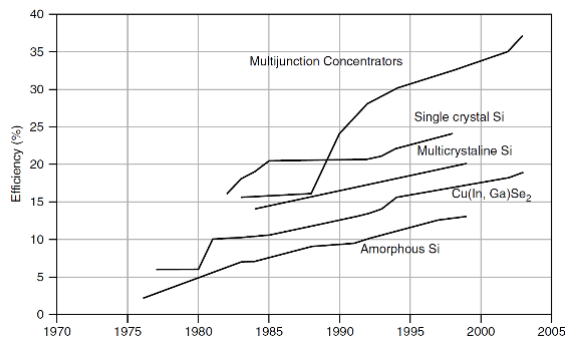
CHAPTER 8

PHOTOVOLTAIC MATERIALS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

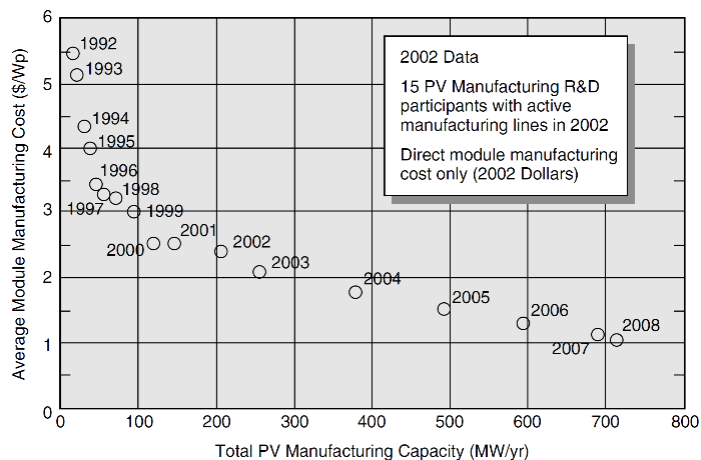


8.1 INTRODUCTION

یک ماده یا وسیله ای که قادر به تبدیل انرژی حاوی فوتون های نوری به ولتاژ الکتریکی و جریان می باشد، فتوولتائیک نامیده می شود



بهترین بازدهی سلول های فتوولتائیک در تکنولوژی های گوناگون (از مرکز ملی فتوولتائیک ها- 2003)



شکل ۸-۲: هزینه های ساخت ماژول PV برای شرکت های ادغام شده DOE/US. براساس تاریخ ثبت شده از سال ۲۰۰۲ (www.nrel.gov/pvmat).

8. 2. BASIC SEMICONDUCTOR PHYSICS

فوتوولتائیک ها از مواد نیمه هادی برای تبدیل نور خورشید به الکتریسیته استفاده می کنند. تکنولوژی انجام چنین کاری بسیار شبیه به تکنولوژی حالت جامدی است که برای ساخت ترانزیستور، دیودها و سایر وسایل نیمه هادی که امروزه استفاده می کنیم می باشد. نقطه شروع برای بسیاری از تولیدات جهانی حال حاضر فوتوولتائیک ها همانند تقریباً تمامی نیمه هادی ها، سیلیکون کریستالی خالص می باشد. که در ستون چهارم جدول تناوبی قرار دارد، که متعلق به گروه IV می باشد. ژرمانیوم یک عنصر دیگر از گروه IV است که به طور مشابه در برخی صنایع الکترونیک به عنوان نیمه هادی به کار می رود. عناصر دیگری که نقش مهمی را در گروه فوتوولتائیک ها بازی می کنند در جدول ۸-۱ به صورت برجسته نشان داده شده اند. برن و فسفر از گروه های ۳ و ۵ به سیلیکون برای ساختن بسیاری از فوتوولتائیکها اضافه شده اند. آرسنیک و گالیوم نیز در ساخت سلول های GaAs بکار میروند. در حالی که کادمیوم و تلریم در سلول های خورشیدی CdTe کارایی دارند.

I	II	III	IV	V	VI
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te

بخشی از جدول تناوبی که شامل مهم ترین فوتوولتائیک ها می شود از جمله: سیلیکون - برن - فسفات - گالیوم - آرسنیک - کادمیوم - تلوریم

در دمای صفر کلوین، سیلیکون یک عایق کامل الکتریکی است. هیچ الکترون لایه ظرفیت آزادی همانند الکترون های موجود در فلزات ندارد. با افزایش دما بعضی از الکترونها انرژی کافی برای آزاد کردن خود از هسته پیدا می کنند و به عنوان جریان الکتریکی شروع به حرکت می کنند. با گرم شدن بیشتر، تعداد الکترونهای آزاد بیشتری جریان را حمل کرده و بنا بر این هدایت الکتریکی آن با افزایش دما بیشتر می شود

هدایت الکتریکی سیلیکونها در دمای عادی بسیار پایین است بنابراین به عنوان نیمه هادی اطلاق می گردند.

انرژی لازم برای اینکه الکترون بتواند از لایه ممنوع (فاصله بین دو لایه مجاز انرژی، لایه ممنوع نامیده می شود) به لایه هدایت منتقل گردد به عنوان انرژی باند-گپ نامیده می شود. Eg واحد انرژی باند-گپ الکترون ولت است. یک الکترون ولت انرژی است که یک الکترون جذب می کند تا ولتاژ آن یک ولت افزایش یابد. $(1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J})$

انرژی باند - گپ برای سیلیکون 1.2eV است، بدین معنی که الکترون برای جدا کردن خود از نیروی الکترواستاتیکی که آن را به هسته خود گره زده است نیاز به این مقدار انرژی دارد و این نیز به معنی جهش به لایه هدایت می باشد.

فوتون ها همان طور که توسط انرژیشان توصیف می گردند می توانند توسط طول موج و یا فرکانس خود، توصیف گردند. این سه پارامتر به صورت زیر به هم مرتبط می شوند

$$c = \lambda \nu$$

where c is the speed of light (3×10^8 m/s), ν is the frequency (hertz), λ is the wavelength (m), and

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (8.2)$$

where E is the energy of a photon (J) and h is Planck's constant (6.626×10^{-34} J-s).

مثال ۸-۱: فوتون هایی برای ایجاد زوج های الکترون-حفره در سیلیکون :

بیشینه طول موج که یک فوتون می تواند یک جفت الکترون-حفره را در سیلیکون به وجود آورد چقدر است؟ کمینه فرکانس چقدر است؟ باند-گپ سیلیکون برابر با 1.12 eV بوده و یک الکترون ولت برابر با 1.6×10^{-19} ژول می باشد.

حل مثال :

از ۲-۸ طول موج باید کمتر از :

Solution. From (8.2) the wavelength must be less than

$$\lambda \leq \frac{hc}{E} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.12 \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 1.11 \times 10^{-6} \text{ m} = 1.11 \mu\text{m}$$

and from (8.1) the frequency must be at least

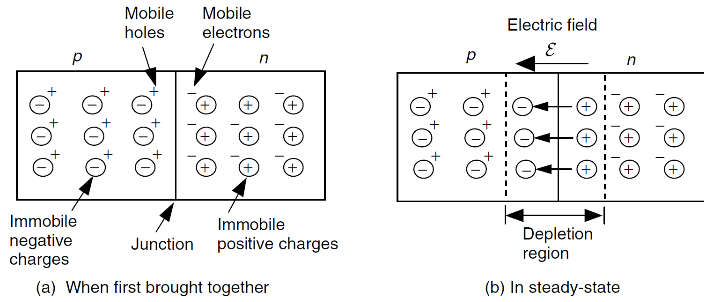
$$\nu \geq \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.11 \times 10^{-6} \text{ m}} = 2.7 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

8.2.4 The p-n Junction

در طول زمانی که سلول های خورشیدی در معرض فتونهای با انرژی باند گپ بالا قرار می گیرند، جفت الکترون - حفره تولید می شود. مشکل این است، که این الکترونها می توانند دوباره به حفره ها باز گردند و هر دو حامل جریان از بین می روند. برای جلوگیری از این ترکیب مجدد، الکترونهای باند هدایت بایستی بصورت مستمر از حفره ها دور نگهداشته شوند. در PVها این عمل با ایجاد یک میدان الکتریکی توسط خود نیم هادی که باعث می شود الکترونها در یک جهت و حفره ها در جهت دیگر حرکت کنند ایجاد می شود

عناصر پنج ظرفیتی که الکترونها را به نیم هادی می دهند را دهنده گویند. بنابراین در حال حاضر بار منفی وجود دارد که می تواند در اطراف کریستال حرکت کند، یک نیم هادی که با اتم های دهنده آلائیده شده به عنوان یک کانال های نوع n شناخته می شود.

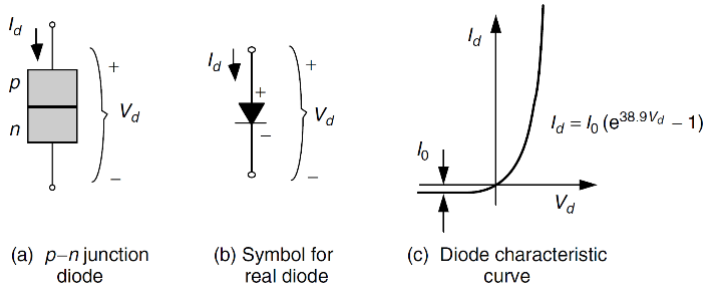
هر پذیرنده یک حفره بار مثبت که آزادانه درون کریستال حرکت می کند را ایجاد کرده است، بنابراین این سمت از نیمه هادی ماده ی نوع p نامیده شده است



شکل ۸-۱۴ الف) هنگامی که یک پیوند p-n برای اولین بار شکل می گیرد حفره های متحرکی در سمت p و الکترون های متحرکی نیز در سمت n وجود دارند (ب) هنگامی که این عناصر متحرک از مسیر پیوند عبور می کنند یک میدان الکتریکی مقاوم ساخته می شود که به سرعت از انتشار آن ها جلوگیری می کند.

8.2.5 The p-n Junction Diode

هر کس که با خانواده ی نیمه هادی ها آشنا باشد بی درنگ متوجه می شود چیزی که تا این جا در مورد آن صحبت کردیم فقط یک دیود عادی پیوند p-n می باشد اگر ولتاژ vd را روی ترمینال های دیود بیاندازیم جریان رو به جلو به راحتی در میان دیود از سمت p به سمت n جاری می گردد. اما اگر تلاش کنیم که جریان را در جهت عکس جاری کنیم تنها یک جریان بسیار کوچک (تقریباً) موسوم به جریان اشباع معکوس I0 جاری خواهد شد. این جریان اشباع معکوس نتیجه ی حامل های تولید شده توسط حرارت با حرکت حفره ها به سمت p و الکترون ها به سمت n، می باشد. در حالت بایاس مستقیم ولتاژی که روی دیود قرار می گیرد مقدار اندکی در حد چند دهم ولت است.



شکل ۸-۱۵ الف) یک دیود پیوند p-n به جریان اجازه داده که به آسانی از سمت p به سمت n جاری گردد. (ب) نماد آن . p-ن پیوند (ب) منحنی مشخصه ی آن. که در آن Id جریان دیود در مسیر پیکان q (A) بار الکترون

منحنی مشخصه ی ولتاژ جریان برای دیود پیوند p-n با معادله ی دیود شاکلی توصیف شده است

$$I_d = I_0(e^{qV_d/kT} - 1)$$

where I_d is the diode current in the direction of the arrow (A), V_d is the voltage across the diode terminals from the p -side to the n -side (V), I_0 is the reverse saturation current (A), q is the electron charge (1.602×10^{-19} C), k is Boltzmann's constant (1.381×10^{-23} J/K), and T is the junction temperature (K).

Substituting the above constants into the exponent of (8.3) gives

با جایگزین کردن ثابت های بالا در معادله داریم

$$\frac{qV_d}{kT} = \frac{1.602 \times 10^{-19}}{1.381 \times 10^{-23}} \cdot \frac{V_d}{T(\text{K})} = 11,600 \frac{V_d}{T(\text{K})} \quad (8.4)$$

A junction temperature of 25°C is often used as a standard, which results in the following diode equation:

$$I_d = I_0(e^{38.9V_d} - 1) \quad (\text{at } 25^\circ\text{C}) \quad (8.5)$$

مثال ۸-۲ یک دیود پیوند p-n، یک دیود پیوند p-n را در ۲۵ درجه سانتی گراد با جریان اشباع معکوس 10^{-9} آمپر در نظر بگیرید. ولتاژی که روی دیود قرار می گیرد را هنگامی که جریان های زیر را دارا می باشد محاسبه کنید:

(a) بدون جریان (ولتاژ مدار باز) 1A (b) 10A (c)

حل: (a) در حالت مدار باز $I_d = 0$ بنابراین $V_d = 0$

(b) با $I_d = 1$ می توان V_d را بدین صورت محاسبه کرد:

Solution

a. In the open-circuit condition, $I_d = 0$, so from (8.5) $V_d = 0$.

b. With $I_d = 1$ A, we can find V_d by rearranging (8.5):

$$V_d = \frac{1}{38.9} \ln \left(\frac{I_d}{I_0} + 1 \right) = \frac{1}{38.9} \ln \left(\frac{1}{10^{-9}} + 1 \right) = 0.532 \text{ V}$$

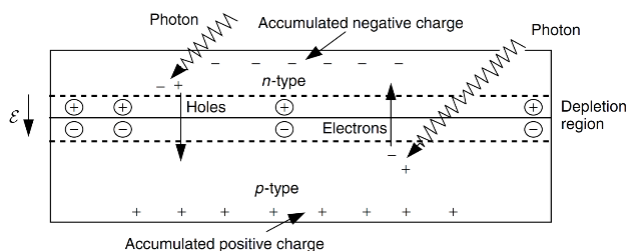
c. with $I_d = 10$ A,

$$V_d = \frac{1}{38.9} \ln \left(\frac{10}{10^{-9}} + 1 \right) = 0.592 \text{ V}$$

8.3 A GENERIC PHOTOVOLTAIC CELL

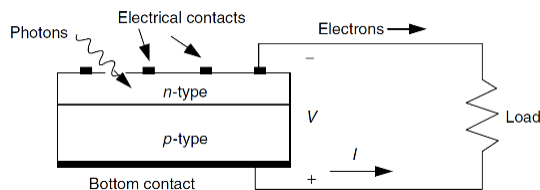
می خواهیم بدانیم هنگامی که یک پیوند p-n در معرض نور خورشید قرار گیرد چه اتفاقی در آن رخ می دهد.

هنگامی که فوتون ها جذب گردند، جفت های حفره - الکترون شکل می گیرند. همانطور که در شکل ۸-۱۶ نشان داده شده است اگر این حاملین بارهای متحرک به مجاورت پیوند برسند، میدان الکتریکی در ناحیه تهی حفره ها را به سمت p و الکترون ها را به سمت n می راند. سمت p حفره ها و سمت n الکترون ها را انباشته می کنند که ولتاژی را ایجاد می کنند که می تواند برای تحویل جریان به بار مورد استفاده قرار گیرد



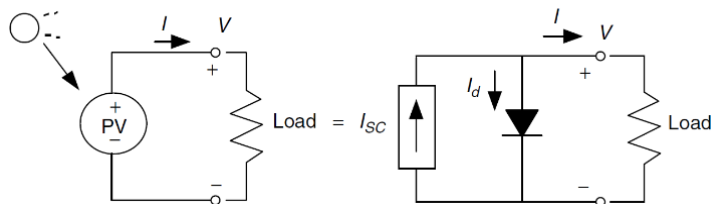
شکل ۸-۱۶ هنگامی که فوتون ها، زوج های حفره - الکترون ایجاد می کنند، میدان الکتریکی در ناحیه تهی حفره ها را به سمت p و الکترون ها را به سمت n از سلول جابجا می کند.

اگر اتصالات الکتریکی به قسمت بالای سلول الصاق شده باشد الکترون ها از سمت n خارج شده و در سیم اتصال جاری شده، به بار سرازیر می شود و سپس به سمت p باز می گردند. چون سیم نمی تواند حفره ها را هدایت کند، این تنها الکترون ها هستند که واقعاً درون مدار به گردش در می آیند. وقتی که الکترون ها به سمت p می رسند با حفره ها ترکیب شده و مدار کامل می شود. به صورت قراردادی، بارهای مثبت در جهت خلاف حرکت الکترون ها جریان دارند و بنابراین پیکان مربوط به جریان در شکل نشان می دهد که جریان از سمت p به بار رفته و به سمت n باز می گردد



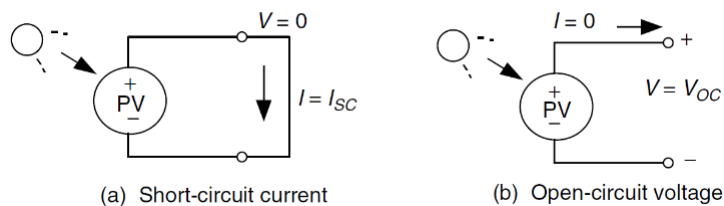
شکل ۸-۱۷ الکترون ها از سمت n به سمت بار جاری شده و به سمت p یعنی جایی که مجدداً با حفره ها ترکیب می گردند، باز می گردد. جهت جریان قراردادی I نیز در جهت خلاف حرکت الکترون ها می باشد

ساده ترین مدار معادل برای یک سلول فتوولتائیک



شکل ۸-۱۸ یک مدار معادل ساده برای یک سلول فتوولتائیک حاوی یک منبع جریان ایده آل هدایت شده توسط نور خورشید که به صورت موازی با یک دیود واقعی قرار دارد.

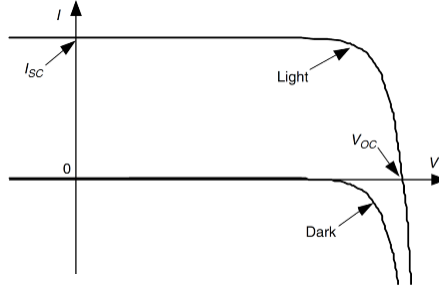
دو وضعیت ویژه مورد توجه برای PV واقعی و برای مدار معادلش وجود دارد. همان طور که در شکل ۸-۱۹ نشان داده شده این دو وضعیت شامل (۱) جریانی که به هنگام اتصال ترمینال ها به همدیگر جاری می شود (جریان اتصال کوتاه i_{sc} و ولتاژی که روی ترمینال ها قرار می گیرد به هنگامی که مسیر هدایت جریان باز است) ولتاژ مدار باز، v_{oc}) هنگامی که مسیر هدایت مدار معادل برای سلول PV اتصال کوتاه باشد، هیچ جریانی در دیود واقعی جاری نمی گردد بنابراین $V_d=0$ لذا همه ی جریان از منبع ایده آل به سمت مسیر اتصال کوتاه جاری می شود. چون کچه جریان اتصال کوتاه باید برابر I_{sc} گردد زاویه منبع جریان ایده آل نیز باید به خودی خود برابر I_{sc} شود.



شکل ۸-۱۹ دو پارامتر مهم برای فتوولتائیک ها جریان اتصال کوتاه i_{sc} و ولتاژ مدار باز v_{oc} می باشند

معادله ی ولتاژ و جریان را برای مدار معادل سلول PV

$$I = I_{SC} - I_d \qquad I = I_{SC} - I_0 (e^{qV/kT} - 1)$$



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

هنگامی که مدار هدایت PV باز است ،
I=0 و می توان آن را برای محاسبه
ولتاژ مدار باز V_{OC} حل کرد

And at 25°C, (8.8) and (8.9) become

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

and

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



مثال ۳-۸ منحنی V-I برای یک سلول فوتو ولتائیک سلول فوتو ولتائیک.

100 CM² را با جریان اشباع معکوس $10^{-11} \frac{A}{CM^2}$ در نظر بگیرید. در حالت تابش کامل این سلول یک جریان اتصال کوتاه برابر $40 \text{ cm}^2/mA$ در ۲۵ درجه سانتی گراد فراهم می کند. ولتاژ مدار باز را برای تابش کامل و هم چنین برای ۵۰٪ تابش محاسبه کنید. نتایج حاصل را نیز رسم کنید.

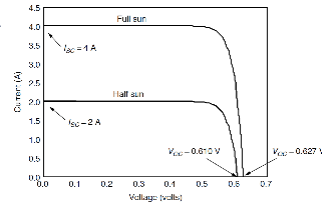
Solution. The reverse saturation current I_0 is $10^{-12} \text{ A/cm}^2 \times 100 \text{ cm}^2 = 1 \times 10^{-10} \text{ A}$. At full sun I_{SC} is $0.040 \text{ A/cm}^2 \times 100 \text{ cm}^2 = 4.0 \text{ A}$. From (8.11) the open-circuit voltage is V_t

$$V_{OC} = 0.0257 \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) = 0.0257 \ln \left(\frac{4.0}{10^{-10}} + 1 \right) = 0.627 \text{ V}$$

Since short-circuit current is proportional to solar intensity, at half sun $I_{SC} = 2 \text{ A}$ and the open-circuit voltage is

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

Plotting (8.10) gives us the following:



یک مدار معادل دقیق تر برای یک سلول PV

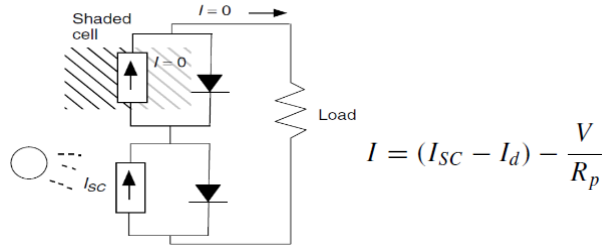


Figure 8.21 The simple equivalent circuit of a string of cells in series suggests no current can flow to the load if any cell is in the dark (shaded). A more complex model can deal with this problem.

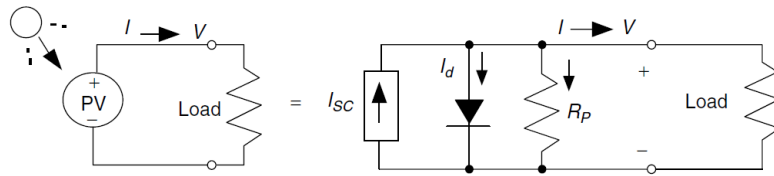


Figure 8.22 The simple PV equivalent circuit with an added parallel resistance.

Chapter 8: PHOTOVOLTAIC MATERIALS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS



For a cell to have losses of less than 1% due to its parallel resistance, R_p should be greater than about

$$R_p > \frac{100V_{OC}}{I_{SC}}$$

For a large cell, I_{sc} might be around 7 A and V_{OC} might be about 0.6 V, which says its parallel resistance should be greater than about 9 Ω .

An even better equivalent circuit will include series resistance as well as parallel resistance. Before we can develop that model, consider Fig. 8.24 in which the original PV equivalent circuit has been modified to just include some **series resistance, R_s** . Some of this might be **contact resistance associated with the bond between the cell and its wire leads**, and some might be due to the resistance of the semiconductor itself.

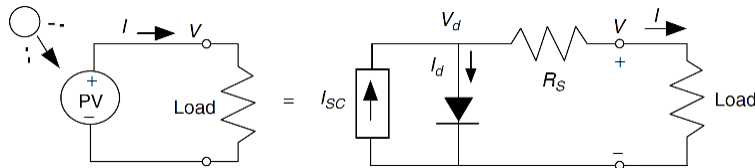


Figure 8.24 A PV equivalent circuit with series resistance.

Chapter 8: PHOTOVOLTAIC MATERIALS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS



and then add the impact of R_S ,

$$V_d = V + I \cdot R_S$$

to give

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

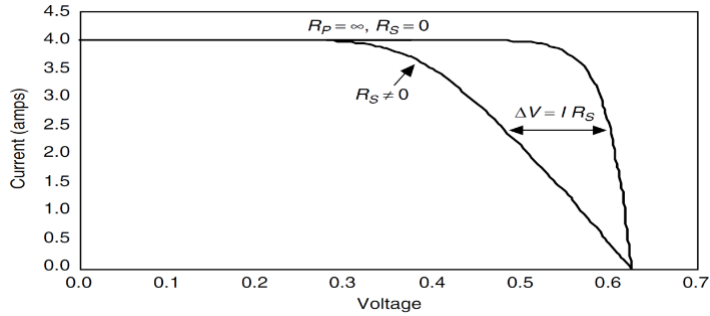


Figure 8.25 Adding series resistance to the PV equivalent circuit causes the voltage at any given current to shift to the left by $V = I R_S$.

Chapter 8: PHOTOVOLTAIC MATERIALS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

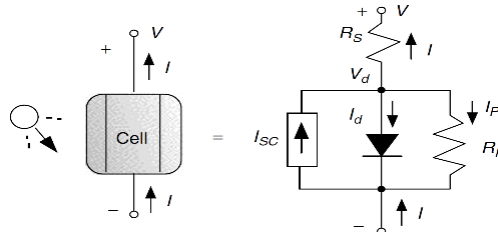


For a cell to have less than 1% losses due to the series resistance, R_S will need to be less than about

$$R_S < \frac{0.01 V_{OC}}{I_{SC}}$$

برای یک سلول بزرگ ، جریان اتصال کوتاه حدوداً هفت آمپر و V_{oc} حدوداً $0.6V$ می باشد که با احتساب نامعادله ی بالا مقاومت موازی می بایست ۹ اهم باشد

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



شکل ۸-۲۶: مدار معادل پیچیده تر مدار PV با در نظر گرفتن مقاومت های سری و موازی دیود سایه دار نشان دهنده ی واقعی بودن آن است نه ایده آل بودن.

Under the standard assumption of a 25°C cell temperature, (8.17) becomes

$$I = I_{SC} - I_0 \left[e^{38.9(V+IR_S)} - 1 \right] - \frac{1}{R_P} (V + IR_S)$$

Unfortunately, (8.18) is a complex equation for which there is no explicit solution for either voltage V or current I . A **spreadsheet solution**, however, is fairly straightforward and has the extra advantage of enabling a graph of I versus V to be obtained easily. The approach is based on incrementing values of diode voltage, V_d , in the spreadsheet. For each value of V_d , corresponding values of current I and voltage V can easily be found.

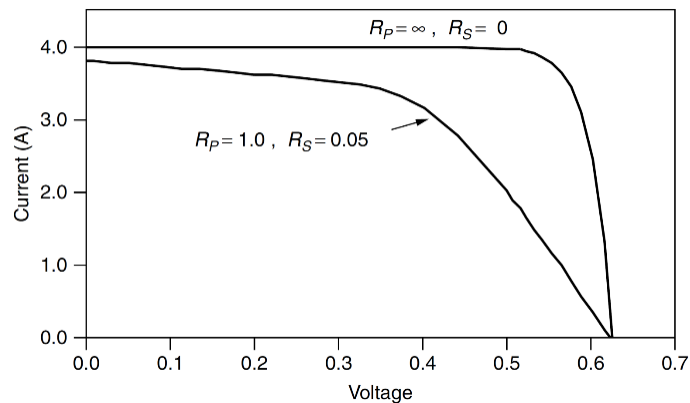
$$I_{SC} = I + I_d + I_P$$

با بازآرایی و جانشینی معادله ی دیود شاکلی در دمای ۲۵ درجه به صورت زیر خواهیم داشت

$$I = I_{SC} - I_0 (e^{38.9V_d} - 1) - \frac{V_d}{R_P}$$

ولتاژ دو سر یک سلول منفرد به صورت زیر است

$$V = V_d - IR_S$$

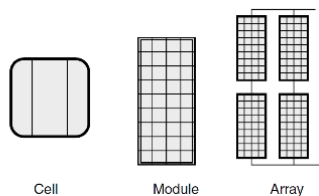


شکل ۸-۲۵: مقاومت های سری و موازی هم جریان و هم ولتاژ را کاهش می دهند جهت ارتقای کارایی سلول مقادیر بالای R_p و بسیار کم R_s می باشد

از سلول ها به ماژول ها و از ماژول ها به آرایه ها:

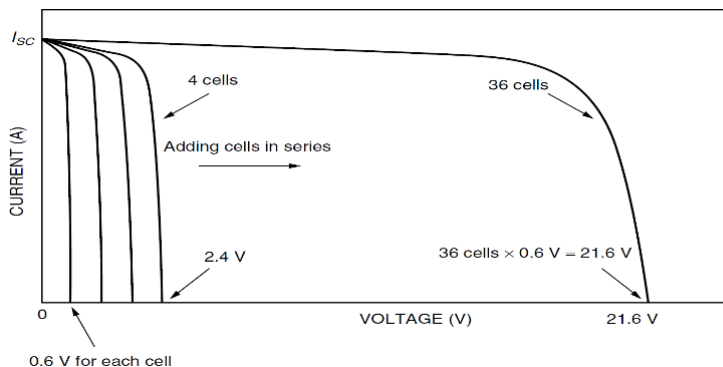
از آنجا که یک سلول فقط $0.5V$ تولید می کند، کارایی تک سلولی بسیار کم است. در عوض بسته هایی با محتوای سلول های متعدد نزدیک به هم سیم بندی شده که نسبت به آب و هوا عایق کاری شده اند در عمل استفاده می شدند که به ماژول ها معروفند.

به طور معمول ماژول ها حاوی 36 سلول می باشند که جمعاً $12V$ ولت تولید می کند این ماژول را «ماژول 12 ولتی» می نامند اگر چه این ماژول توانایی تولید ولتاژهای خیلی بیشتر از این را دارد. بعضی از ماژول ها حاوی 33 عدد سلولند که در شارژ نوع خاصی از باتری ها به کار می روند. ماژول های 72 سلولی که امروزه به صورت متداول در آمده اند تا ولتاژ $24V$ را می توانند تولید کنند این گونه ماژول ها می توانند به صورت یک مجموعه سری 72 تایی ظاهر شوند یا اینکه به دو مجموعه سلول 36 تایی تقسیم شوند. ماژول های مختلط می توانند جهت ارتقای ولتاژ به صورت سری و موازی جهت ارتقای جریان به صورت موازی به هم وصل شوند که در این صورت حاصل ضرب آنها توان خواهد بود. یکی از عوامل مهم در طراحی PV ها شناسایی تعداد سلول سری و موازی مورد نیاز در یک مجموعه می باشد



8.4.1 From Cells to a Module

When photovoltaics are **wired in series**, they all carry the same current, and at any given current their voltages add as shown in Fig. 8.29. That means we can continue the spreadsheet solution of (8.18) to find an overall module voltage



شکل ۸-۲۹: برای سلول های سیم بندی شده به صورت سری ، ولتاژها در هر جریانی جمع می شوند یک ماژول نوعی 36 سلول دارد.



Example 8.4 Voltage and Current from a PV Module. A PV module is made up of 36 identical cells, all wired in series. With 1-sun insolation (1 kW/m²), each cell has short-circuit current $I_{SC} = 3.4$ A and at 25°C its reverse saturation current is $I_0 = 6 \times 10^{-10}$ A. Parallel resistance $R_p = 6.6$ and series resistance $R_s = 0.005$.

- Find the voltage, current, and power delivered when the junction voltage of each cell is 0.50 V.
- Set up a spreadsheet for I and V and present a few lines of output to show how it works

Solution.

a. Using $V_d = 0.50$ V in (8.20) along with the other data gives current:

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

$$= 3.4 - 6 \times 10^{-10}(e^{38.9 \times 0.50} - 1) - \frac{0.50}{6.6} = 3.16 \text{ A}$$

Under these conditions, (8.22) gives the voltage produced by the 36-cell module:

$$V_{\text{module}} = n(V_d - IR_s) = 36(0.50 - 3.16 \times 0.005) = 17.43 \text{ V}$$

Power delivered is therefore

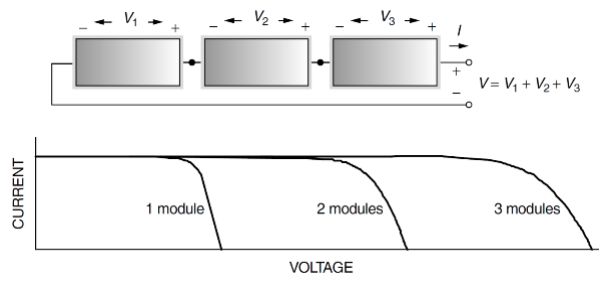
$$P(\text{watts}) = V_{\text{module}} I = 17.43 \times 3.16 = 55.0 \text{ W}$$

صفحه گسترده ها مانند زیر خواهد بود:

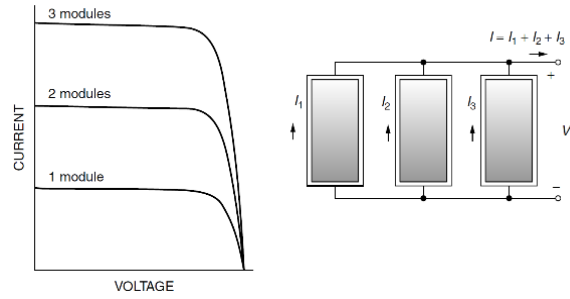
b. A spreadsheet might look something like the following:

Number of cells, $n = 36$			
Parallel resistance/cell R_p (ohms) = 6.6			
Series resistance/cell R_s (ohms) = 0.005			
Reverse saturation current I_0 (A) = 6.00E-10			
Short-circuit current at 1-sun (A) = 3.4			
V_d	$I = I_{SC} - I_0(e^{38.9V_d} - 1) - \frac{V_d}{R_p}$	$V_{\text{module}} = n(V_d - IR_s)$	P (watts) = $V_{\text{module}} I$
0.49	3.21	17.06	54.80
0.50	3.16	17.43	55.02
0.51	3.07	17.81	54.75
0.52	2.96	18.19	53.76
0.53	2.78	18.58	51.65
0.54	2.52	18.99	47.89
0.55	2.14	19.41	41.59

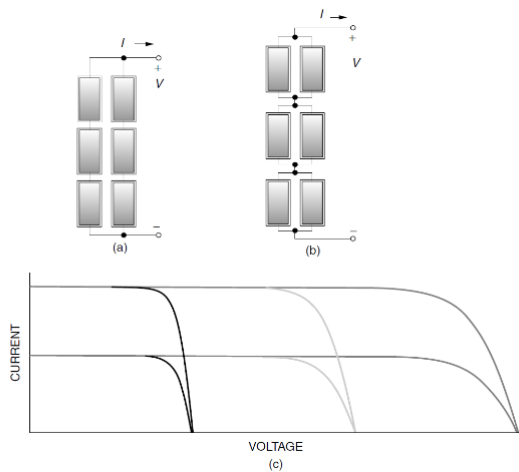
Notice that we have found the maximum power point for this module, which is at $I = 3.16$ A, $V = 17.43$ V, and $P = 55$ W. This would be described as a 55-W module



شکل ۸-۳۰ برای ماژول های سری، در جریان مشخص و هر ولتاژ



شکل ۸-۳۱ دو راه جهت اتصال ماژول های موازی، در ولتاژ مشخص و هر مقدار جریان.



شکل ۸-۳۲ دو راه جهت اتصال ماژول ها ، به صورت سری و موازی .

جهت در نظر گرفتن این اثرات تابشی و دمایی معمولاً از شاخصی به عنوان NOCT یا دمایی بهره برداری نرمال سلول نام می‌برند. این شاخص با شرایط 20°C دما و تابش 0.8 kW/m^2 و سرعت باد $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ اندازه‌گیری می‌شود. جهت در نظر گرفتن دمای محیط داریم:

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

که T_{cell} دمای سلول، T_{amb} دمای محیط و هم تابش خورشید است (بر حسب kw/m^2) زمانی که NOCT داده نشده است، رویکرد دیگری جهت یافتن دمای سلول از راه زیر است:

$$T_{\text{cell}} = T_{\text{amb}} + \gamma \left(\frac{\text{Insolation}}{1 \text{ kW/m}^2} \right)$$

که فاکتور γ متناسب با دو تپه‌ی سلول مشخص می‌شود.

مقادیر معمول بین 25°C و 35°C تغییر می‌کند. که از این رو، در تابش 1-sun سلول‌ها از محیط اطراف خود گرمتر می‌باشند.

مثال ۸-۵: اثرات دما بر روی توان ماژول (PV):

برای یک ماژول با مشخصات 150-wBP2150s تحت شرایط 1-sun و دمای محیط 30°C ، دمای سلول، ولتاژ مدار باز، توان ماکزیمم را بیابید. در ضمن NOCT سلول 47°C می‌باشد.

حل: با استفاده از (۸-۲۴) با $S = 1 \text{ kW/m}^2$ دمای سلول به صورت زیر خواهد بود:

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

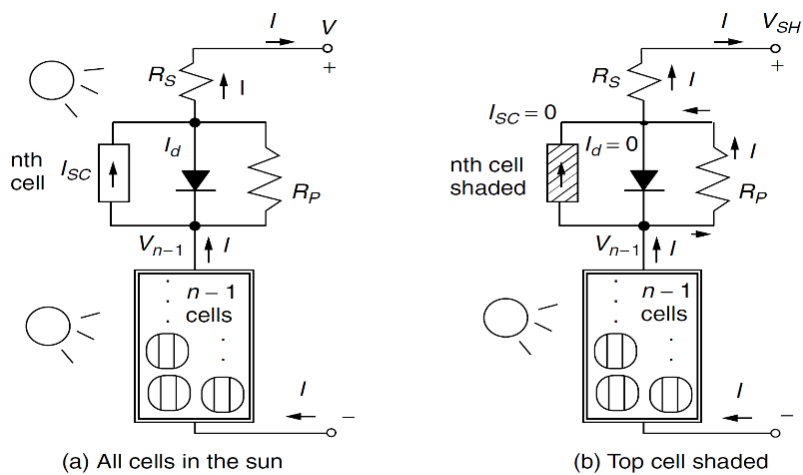
از جدول ۸-۳ برای این ماژول دردمای استاندارد 25°C داریم $V_{\text{oc}} = 42.87$. از این رو که V_{oc} افقی به اندازه $0.37\%/^{\circ}\text{C}$ خواهد داشت V_{oc} جدید از این قرار خواهد بود.

$$V_{\text{oc}} = 42.87 [1 + 0.0037(64 - 25)] = 36.77$$

توان ماکزیمم با افت $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ خواهد بود

$$P_{\text{max}} = 150 \cdot W [1 - 0.005(64 - 25)] = 121 \text{ W}$$

که افت توانی برابر ۱۹٪ مقدار نامی خود را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۳۷-الف) یک ماژول با n سلول که سلول بالایی آن در آفتاب است و (ب) یا اینکه در سایه است.

از آنجا که تمام n سلول ها جریان I را حمل می کنند و ولتاژ خروجی V باشد ولتاژ $n-1$ سلول خواهد بود.

$$V_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n}\right)V$$

با ترکیب (۸-۲۶) و (۸-۲۷) داریم:

$$V_{sh} = \left(\frac{n-1}{n}\right)V - (R_p + R_s)I \quad (۸-۲۸)$$

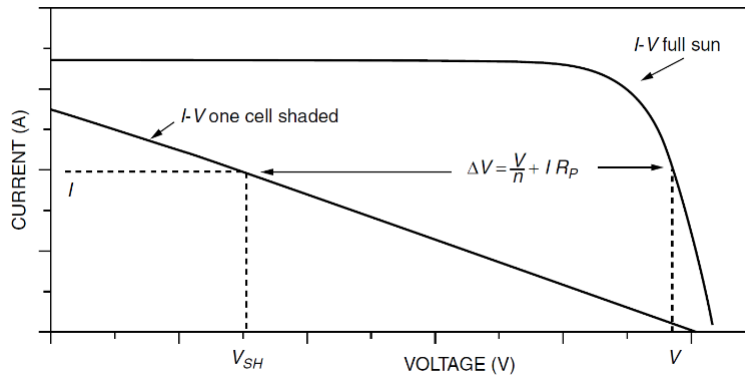
افت ولتاژ در هر جریان به صورت ΔV ناشی از سلول سایه دار،

$$\Delta V = V - V_{sh} = V - \left(\frac{n-1}{n}\right)V + I(R_p + R_s) \quad (۸-۲۹)$$

$$\Delta V = \frac{V}{n} + I(R_p + R_s) \quad (۸-۳۰)$$

از این رو که در جریان وارد شده منحنی $I-V$ با یک سلول سایه دار به اندازه ΔV افت می کند. اثر بارز این امر در شکل (۸-۳۸) آمده است.

شکل ۸-۳۸ اثر سایه یک سلول در یک ماژول n سلولی در هر جریان افت ولتاژ ماژول به اندازه ΔV از V به $V - \Delta V$ خواهد بود.



شکل ۸-۳: اثرات سایه بر روی منحنی I-V یک pr. خط چین نقطه ی کار 13v را برای شارژ یک باتری ۱۲ ولتی نشان می دهد. اثرات جریان شارژ شدید می باشد.

مثال (۸-۶) اثرات سایه بر روی ماژول Pr

ماژول ۳۶ سلولی pr توضیح داده شده در مثال ۸-۴ دارای یک مقاومت موازی $R_p = 6.6 \Omega$ می باشد. در زمان تابش کامل و جریان $I = 2.14 A$ ولتاژ خروجی $V = 19.417$ به دست آمد.

اگر یک سلول سایه دار شود و به هر ترتیب بتوان جریان را ثابت و بدون تغییر نگاه داشت:

الف) توان و ولتاژ خروجی جدید ماژول چه می باشند؟

ب) افت ولتاژ در دو سر سلول سایه دار کدام است؟

ج) چه مقدار توان در سلول سایه دار تلف می شود؟

$$\Delta V = \frac{V}{n} + IR_p = \frac{19/41}{36} + 2/14 \times 6/6 = 14/66v$$

ولتاژ خروجی جدید $19/41 - 14/66 = 4/75v$ خواهد بود. توان تحویلی ماژول با یک سلول سایه دار

$$P_{\text{module}} = VI = 9.75v \times 2.14A = 10.1w$$

جهت مقایسه در هنگام آفتاب کامل توان ۴۱٫۵ بود.

(ب) تمام جریان از مقاومت های سری و موازی سلول سایه دار می گذرد سپس افت حول سلول سایه دار برابر است با:

$$V_c = I(R_p + R_s) = 2.14(6.6 + 0.05) = 14.14v$$

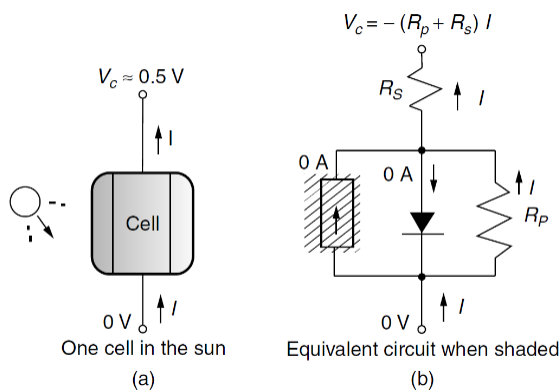
(به طور معمول یک سلول 0.5v به ماژول تحویل می دهد. این سلول سایه دار ولتاژ کل ماژول را تا مقدار 14v کاهش داده است).

(ج) توان تلف شده در دو سر سلول برابر است با افت ولتاژ در جریان

$$P = V_c I = 14.14v \times 2.14A = 30.2w$$

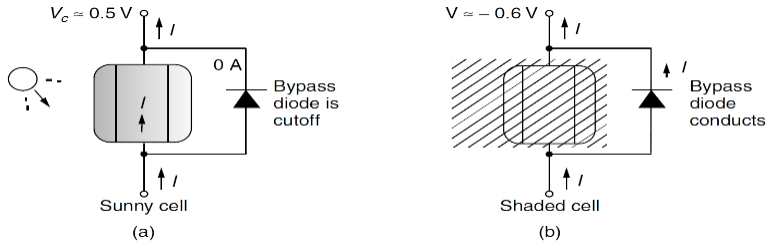
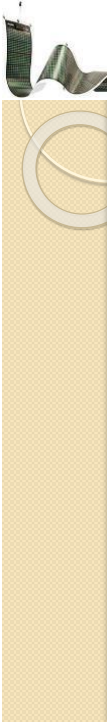
تمام این توان تلف شده به گرما تبدیل می شود. که ممکن است با تولید یک ناحیه داغ باعث آسیب رساندن به لایه پلاستیکی حول سلول شود.

8.7.2 Bypass Diodes for Shade Mitigation

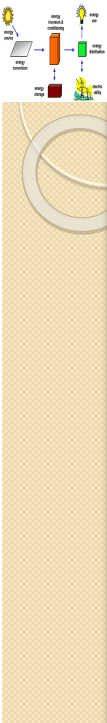


شکل (۸-۴۰) در آفتاب گیری کامل یک سلول ۰٫۵ برای خروجی ماژول تولید می کند لیکن زمانی که یک سلول سایه دار است .

افت ولتاژ بزرگی را حول سلول منجر می شود.



شکل (۸-۴۱): برطرف کردن اثر سایه با دیود کنارگذر. در آفتاب گیری الف) دیود قطع است و تمام جریان نورمال از سلول p۲ عبور می کند. در زمان سایه ب) دیود کنارگذر جریان را هدایت می کند و یک افت ولتاژ ۰.۶ را تولید می کند.



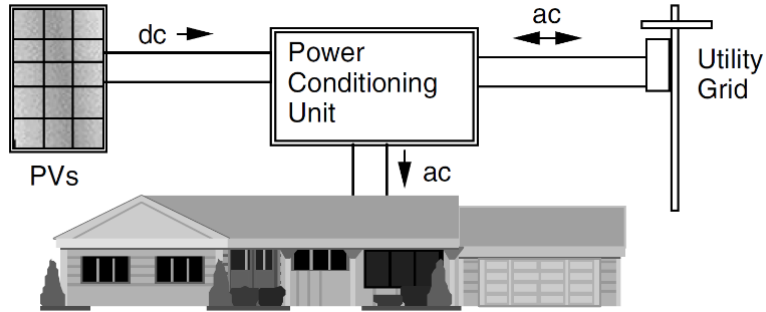
CHAPTER 9

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



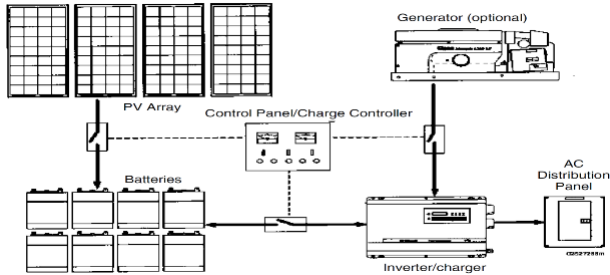
Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

9.1 INTRODUCTION TO THE MAJOR PHOTOVOLTAIC SYSTEM TYPES

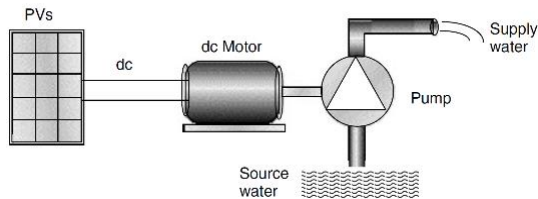


شکل (۹-۱): دیاگرام ساده شده ای از فتوولتائیک های متصل به شبکه

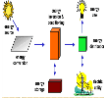
Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



شکل (۹-۲) : نمونه ای از یک سیستم فتوولتائیک منفرد همراه با یک ژنراتور پشتیبان.



شکل (۹-۳) : شمای فنی از یک سیستم پمپاژ آب تغذیه شده بوسیله فتوولتائیک

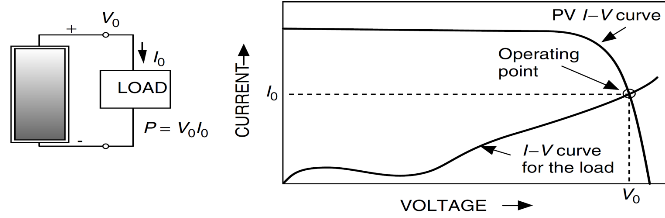


9.2 CURRENT-VOLTAGE CURVES FOR LOADS

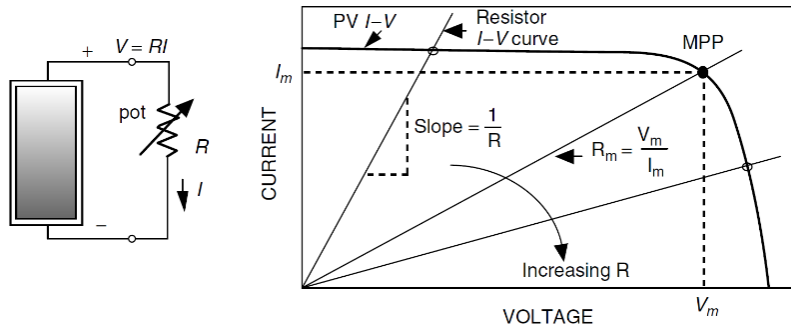
9.2.1 Simple Resistive-Load I-V Curve

$$V = IR \quad \text{or} \quad I = \left(\frac{1}{R}\right) V$$

$$R_m = \frac{V_m}{I_m} \tag{9.2}$$

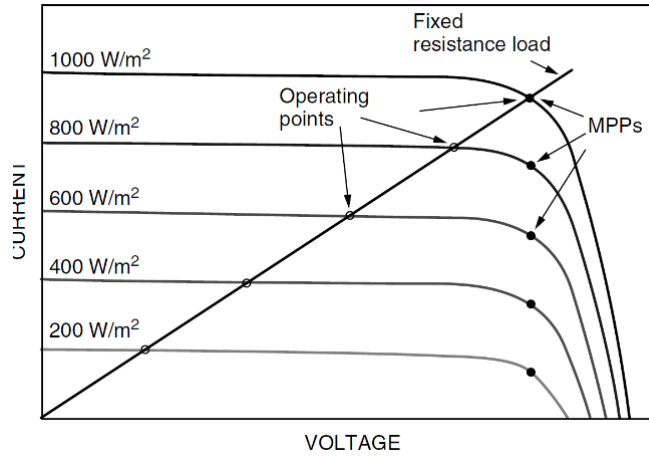


شکل ۹-۴: نقطه کار سیستم محل تلاقی منحنی های جریان- ولتاژ بار و فتوولتاییک است.



شکل (۹-۵): مدولی که توان را به بار مقاومتی ارائه می دهد. با تغییر مقدار مقاومت، نقطه کار روی منحنی جریان-ولتاژ فتوولتاییک تغییر مکان می دهد.

Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



شکل ۹-۶ راندمان یک مدول فتوولتاییک با یک بار مقاومتی ثابت که برای شرایط 1-sun طراحی گردیده است. استبا تغییر میزان تابش خورشید کاهش می یابد. نقاط توپر MPP، نقاط کاری که حداکثر راندمان فتوولتاییک در آنها رخ می دهد را نشان می دهد.

Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



9.2.2 DC Motor I-V Curve

$$V = IR_a + k\omega$$

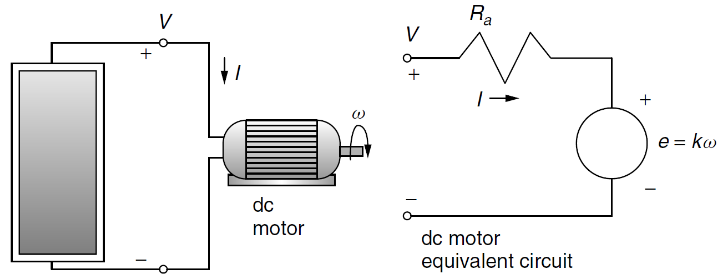
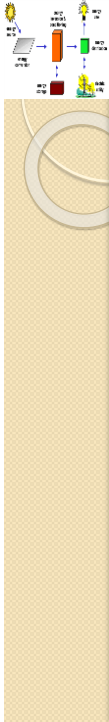


Figure 9.7 Electrical model of a permanent magnet dc motor.



Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

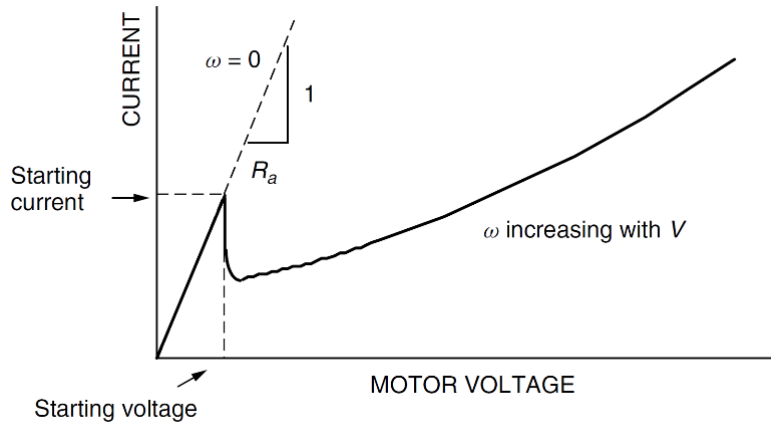


Figure 9.8 Electrical characteristics of a permanent-magnet dc motor.



Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

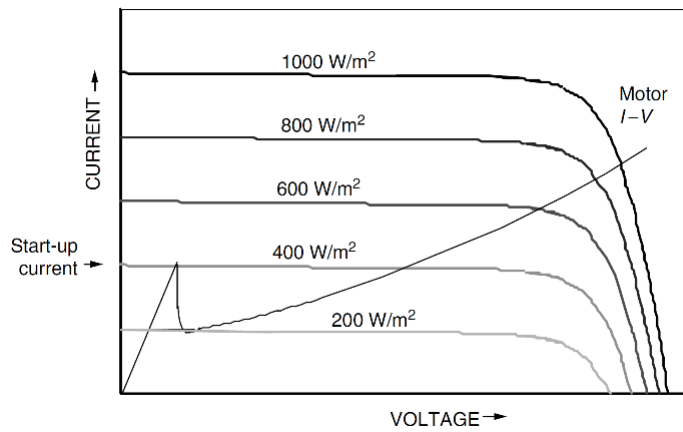


Figure 9.9 DC motor $I-V$ curve on photovoltaic $I-V$ curves for varying insolation. In this example (somewhat exaggerated), the motor won't start spinning until insolation reaches 400 W/m^2 , but after that it only needs 200 W/m^2 to keep running.

Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

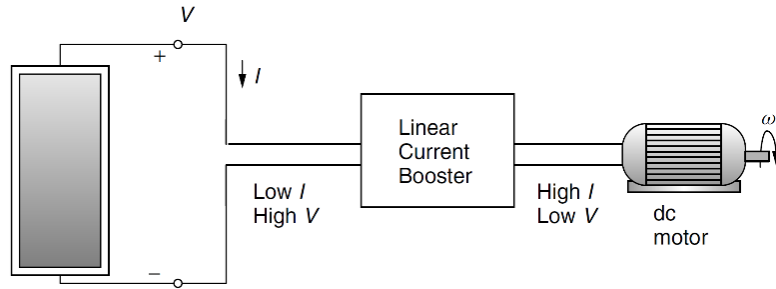


Figure 9.10 A linear current booster (LCB) increases current to help start or keep the motor running in low sunlight.

Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



9.2.3 Battery I-V Curves

$$V = V_B + R_i I$$

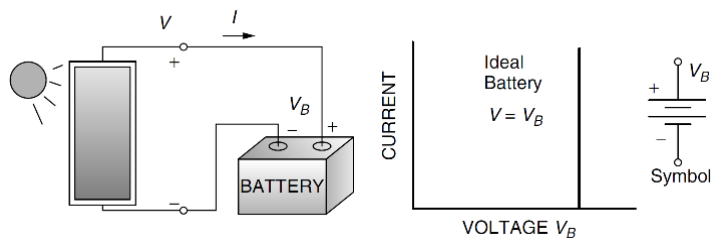
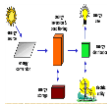


Figure 9.11 An ideal battery has a vertical current–voltage characteristic curve.



Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

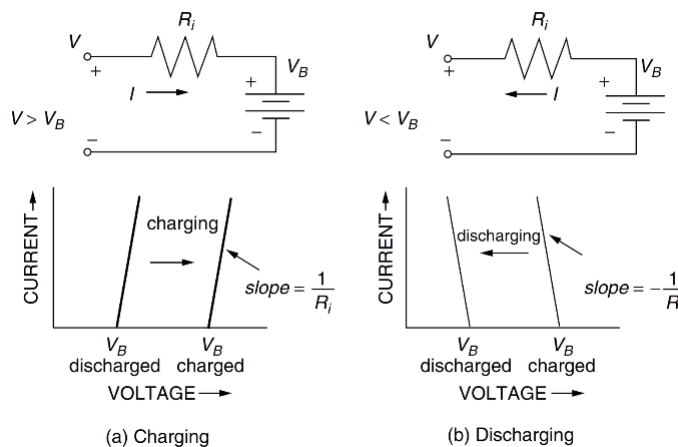
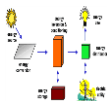


Figure 9.12 A real battery can be modeled as an ideal battery in series with its internal resistance, with current flowing in opposite directions during charging (a) and discharging (b). During charging/discharging, the slightly tilted $I-V$ curve slides right or left.



Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



Example 9.1 Charging a 12-volt Battery. Suppose that a nearly depleted 12-V lead-acid battery has an open-circuit voltage of 11.7V and an internal resistance of 0.03 .

- What voltage would a PV module operate at if it is delivering 6 A to the battery?
- If 20 A is drawn from a fully charged battery with open-circuit voltage 12.7V, what voltage would the PV module operate at?

Solution

- Using (9.4), the PV voltage would be

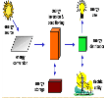
$$V = V_B + R_i I = 11.7 + 0.03 \times 6 = 11.88 \text{ V}$$

- While drawing 20 A after V_B has reached 12.7 V, the output voltage of the battery would be

$$V_{\text{load}} = V_B - I R_i = 12.7 - 20 \times 0.03 = 12.1 \text{ V}$$

and since the voltage that the PVs operate at is determined by the battery voltage, they would also be at 12.1 V.

Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



A **boost converter** is a commonly used circuit to step up the voltage from a dc source, while a **buck converter** is often used to step down voltage. The circuit of Fig. 9.14 is a combination of these two circuits and is called a **buck-boost converter**. A buck-boost converter is capable of raising or lowering a dc voltage from its source to whatever dc voltage is needed by the load. The source in this case is shown as being a PV module and the load is shown as a dc motor, but the basic concept is used for a wide variety of electric power applications. The transistor switch flips on and off at a rapid rate (on the order of 20 kHz) under control of some sensing and logic circuitry that isn't shown. Also not shown is a capacitor across the PVs that helps smooth the voltage supplied by the PVs.

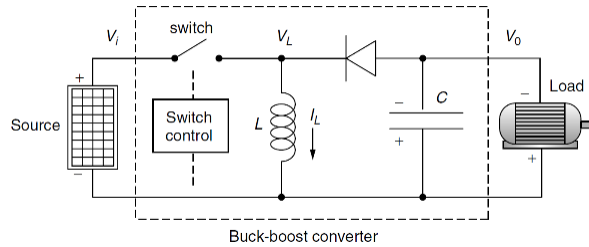
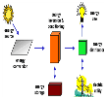


Figure 9.14 A buck-boost converter used as the heart of a maximum power tracker

Chapter 9 : PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



For a 100% efficient MPPT, the product of current and voltage (power) from the PVs is the same as the current-voltage product delivered by the MPPT to the load (Fig. 9.16). One way to visualize the impact of the MPPT is to redraw the PV $I-V$ curves using D as a parameter. For the MPPT's output voltage and current, one goes up and the other goes down compared with the original PV $I-V$ curve as shown in Fig. 9.17.

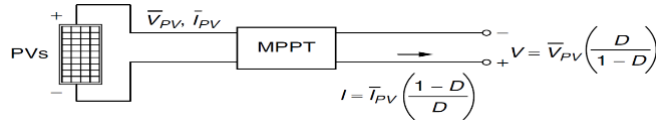


Figure 9.16 The MPPT bumps the PV voltages and currents to appropriate values for the load (one goes up, the other down).

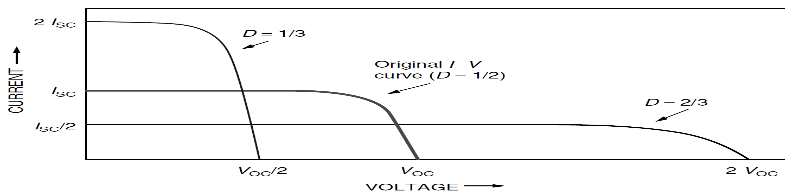


Figure 9.17 Redrawing the PV $I-V$ curves with an MPPT.



9.3 GRID-CONNECTED SYSTEMS

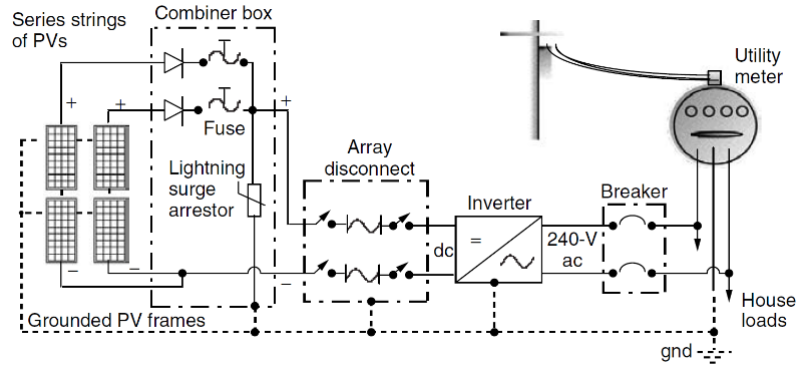


Figure 9.20 Principal components in a grid-connected PV system using a single inverter.