بخش دوم:

خواص فیزیکی و پارامترهای محیطی

مباحث این بخش پیرامون چگونگی تحریک سلول خورشیدی توسط فوتونها و تحلیل مداری سلول خورشیدی، ضریب مطلوبیت و راندمان تبدیل انرژی در تغییرات دمایی و همچنین فیل فاکتور و ساعات پیک تابش و تعیین زاویه ازیموس برای بدست اوردن حداکثر توان گرداوری شده است.

فیزیک فوتون و تحریک سلول خورشیدی

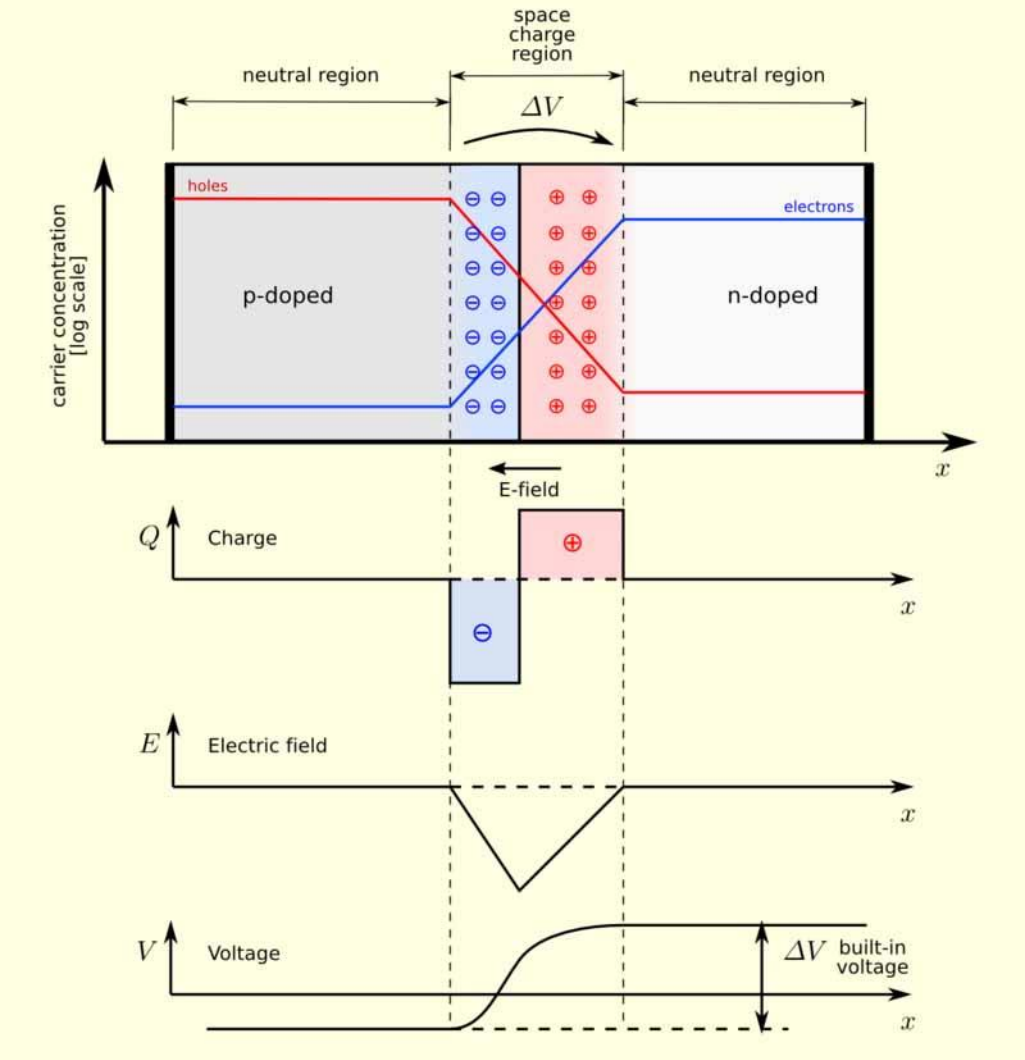
فوتون ذره‌ای بدون بار و بدون جرم و پایدار بوده و دارای پارامترهای پیوسته بردار موج و طول موج λ است. انرژی و اندازه حرکت فوتون طبق معادله $E^2=P^2C^2+m^2c^4$ تعریف می‌شود که P اندازه حرکت بردار و c سرعت حرکت نور در خلا است. انرژی و اندازه حرکت فوتون با فرکانس v با عکس طول موج λ متناسب است. h ثابت پلانک است

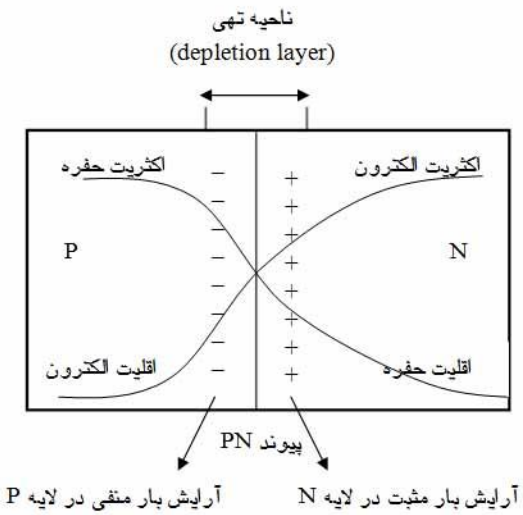
$E=h\omega$

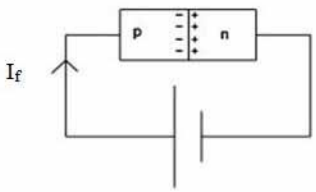
$E=hc/\lambda$

این انرژی هنگام برخورد بر اشیا باعث انتقال اندازه حرکت فوتون بر یک شی و جابجایی الکترونها در محل اثر می‌شود. نیروی الکترومغناطیسی فوق بعنوان اصل اساسی اثر فتوولتایک شناخته می‌شود که موجب قابلیت تحرک الکترون یا جابجایی در پیوند pn فتوولتایک می‌شود.

هنگامی که نور به سطح مایع یا سلول فلزی برخورد می‌کند الکترونها ازاد می‌شوند و موجب جریان فتوالکتریک می‌شود. عملکرد اصلی سلول خورشیدی اثر فوتون ها روی پنل خورشیدی توسط پیوند های PN سیلیکون و جاری شدن الکترون ها در ماده و در نتیجه تولید الکتریسته است. هنگامیکه پرتو نور روی قطعه از سیلیکون اثر میگذارد فوتون های با انرژی کمتر به طور مستقیم از سیلیکون عبور می‌کنند و بعضی از فوتون ها پس از برخورد با نیمه هادی به سطح بر می‌گردند. در شرایط دیگر فوتون ها بوسیله نیمه هادی جذب می‌شوند. در بعضی از نمونه ها وقتی انرژی فوتون بیش از ظرفیت جذب سیلیکون باشد انرژی بصورت گرما اتلاف می‌شود. وقتی پیوند سیلیکونی توسط فوتون ها بمباران می‌شود الکترونهای ازاد بین پیوند کوالانسی ملکولهای سیلیسیوم منتقل می‌شوند و بجای ان به اصطلاح حفره بوجود می‌اید. الکترونهای اتم مجاور بسمت حفره حرکت می‌کنند و بنوبع خود حفره دیگر بوجود می‌اورند و بدین ترتیب یک حفره در طول شبکه کریستالی منتقل می‌گردد در واقع تابش فوتون باعث بوجود امدن زوج الکترون-حفره در نیمه هادی شده است.





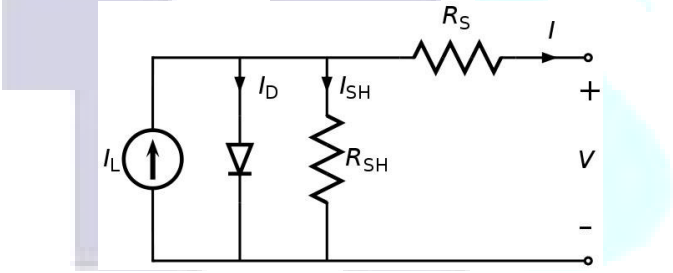


شرط حرکت الکترون توسط تحریک فوتون اینست که انرژی ان بیشتر از باند توقف یا پیوند کوالانسی باشد. بیشتر طیف پرتوهای خورشید که به زمین می‌رسد شامل فوتون های با انرژی بیشتر از حد باند توقف سیلیکون است اما اختلاف بین این فوتونها و باند توقف سیلیکون به دلیل جنبش حرارتی به گرما تبدیل می‌گردد.

جدا کردن حامل بار الکتریکی در سلول خورشیدی به دو صورت انجام می‌شود: رانش و گرانش. در حالت رانش الکترون بوسیله یک میدان الکتریسته ساکن، جاری یا جابجا می‌شود و در سمت دیگر سلول بوجود می‌اید. در حالت انتشار الکترون از ناحیه تمرکز حامل پایینی به ناحیه حامل بالاتر منتقل می‌شود. در فناوری سلول خورشیدی مبتنی بر پیوند PN حالت اصلی جداسازی رانش است و در سلول های خورشیدی غیر PN مثل سبوبهای حساس به رنگ یا پلیمری حالت اصلی جداسازی الکترون ها از طریق انتشار حامل بار است. انتشار حاملان بار الکتریکی در هر دو سمت پیوند بارهایی را ایجاد می‌کند که منجر به تشکیل یک میدان الکتریکی می‌گردد. میدان الکتریکی اثر دیودی خلق می‌کند که موجب جاری شدن بار الکتریکی یا جریان رانشی می‌شود و در نهایت این میدان انتشار الکترونها را متعال می‌کند. ناحیه‌ای که الکترون ها و حفره ها در طول پیوند پخش میشود به نام ناحیه بی باری یا ناحیه تقلیل بار گفته می‌شود زیرا انجا حاوی هیچگونه حامل بار الکتریکی متحرکی نیست.

شکل مداری سلول خورشیدی

سلولهای فتوولتاک می‌توانند به عنوان مولدهای کوچک برق یا دیودهای نوری درنظر گرفته شوند که از لحاظ مداری با یک منبع جریان همراه یک دیود نوری با یک مقاومت سری و موازی شبیه سازی شود. براساس این طرح توان خروجی بر روی منحنی I_V و همچنین جریان اتصال کوتاه و ولتاژمدار باز و همچنین ماکزیمم توان را می‌توان بدست اورد. اگرچه تابش خورشید ، دمای محیط و جرم هوا بطور دائم روی منحنی I_V تاثیر میگذارند.



ولتاژ مدار باز (V_{oc})

حداکثر ولتاژ اندازه‌گیری شده درترمینال خروجی و در شرایط بی باری و جریان خروجی صفر. از مقدار Voc برای طراحی حداکثر ولتاژ مدار ماژولهای خورشیدی یا کل شبکه استفاده می‌شود. ولتاژ مدار باز هر سلول خورشیدی بوسیله خواص طبیعی نیمه هادی اتصال PN و ضریب دمای عملکرد ان مشخص می‌شود. برای مثال در سلول سیلیکونی کریستالی هرگونه افزایش در دمای پیوند ولتاژ مدار باز را کاهش می‌دهد.

جریان اتصال کوتاه (I_{sc})

حداکثر جریان جاری شده در شرایط بی باری و ولتاژ صفر هنگامیکه ترمینال خروجی اتصال کوتاه شده باشد. ویژگیهای Isc با تابش خورشید نسبت مستقیم دارد و وقتی دمای پیوند PN سلول افزایش می‌یابد از مقدار ان کاسته می‌شود.

معادلات مداری سلول خورشیدی

جریان خروجی سلول خورشیدی با توجه به مدار معادل شده ذکر شده بصورت زیر است.

$I=I_L-I_a-I_{sh}$

I_L = جریان تولیدی توسط نور

I_a = جریان دیود بر حسب امپر

I = جریان خروجی در پایانه

I_{sh} = جریان مقاومت شنت

و ولتاژی که در دو سر پایانه ایجاد می‌شود عبارتست از

$V_e=V+IR_s$

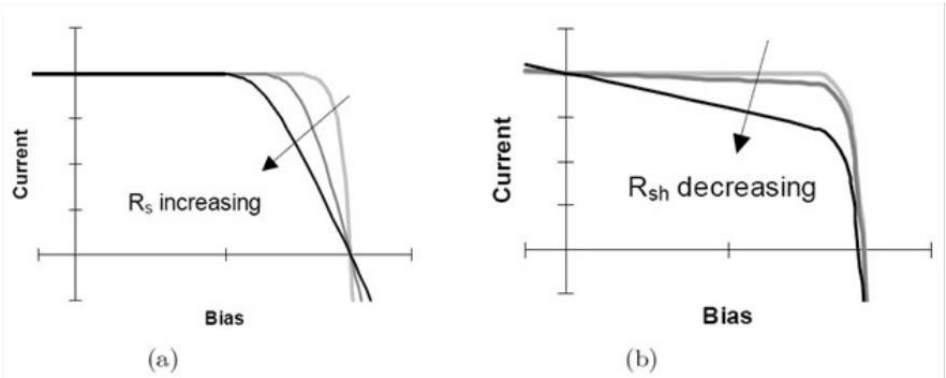
V ولتاژ دو سر دیود یا مقاومت شنت بر حسب ولت و I جریان بر حسب امپر و V_e ولتاژ دو سر ترمینال خروجی و R_s مقاومت سری در مدار است.

مقاومت سری

اگر مقاومت سری در سلول افزایش یابد در نتیجه افت ولتاژ زیادتری در ان ایجاد می‌شود و سبب کاهش عبور جریان می‌شود. این امر سبب کاهش قابل توجهی در ولتاژ ترمینال و کاهش کمی در جریان اتصال کوتاه می‌شود در نتیجه مقاومت سری مشخصا روی عملکرد توان خروجی سلول خورشیدی تاثیر می‌گذارد.

مقاومت موازی

افزایش مقاومت شنت باعث کاهش جریان عبوری از ان می‌شود و در نتیجه ولتاژ پیوند افزایش می‌یابد که منجر به کاهش ولتاژکل همانطور که در شکل نشان می‌دهد می‌شود همراه با کاهش جریان خروجی سلول I و نیز کاهش جزیی ولتاژ مدار باز V_{oc} می‌شود.



شکل 2) اثر افزایش مقاومت سری و کاهش مقاومت موازی روی توان ماکزیمم. (منحنی های بیرونی در هردو حالت برای RS=0 و RSH=∞ است) .

جریان اشباع معکوس

چناچه جریان خروجی یک سلول افزایش یابد Io ولتاژ مدار باز کاهش میابد پدیده ای که مستقیم به جریان اشباع معکوس پیوند PN مربوط می‌شود و سبب افزایش دمای پیوند می‌گردد. جریان اشباع معکوس در واقع جریان نشتی است که از برگشت مجدد حامل بار الکتریکی به ناحیه خنثی در هر طرف پیوند ناشی می‌گردد.

ضریب مطلوبیت و راندمان تبدیل انرژی:

عملکرد سلول و انطباق ان با رفتار دیود اتصال PN ضریب مطلوبیت ان سلول نامیده می‌شود.

راندمان تبدیل انرژی

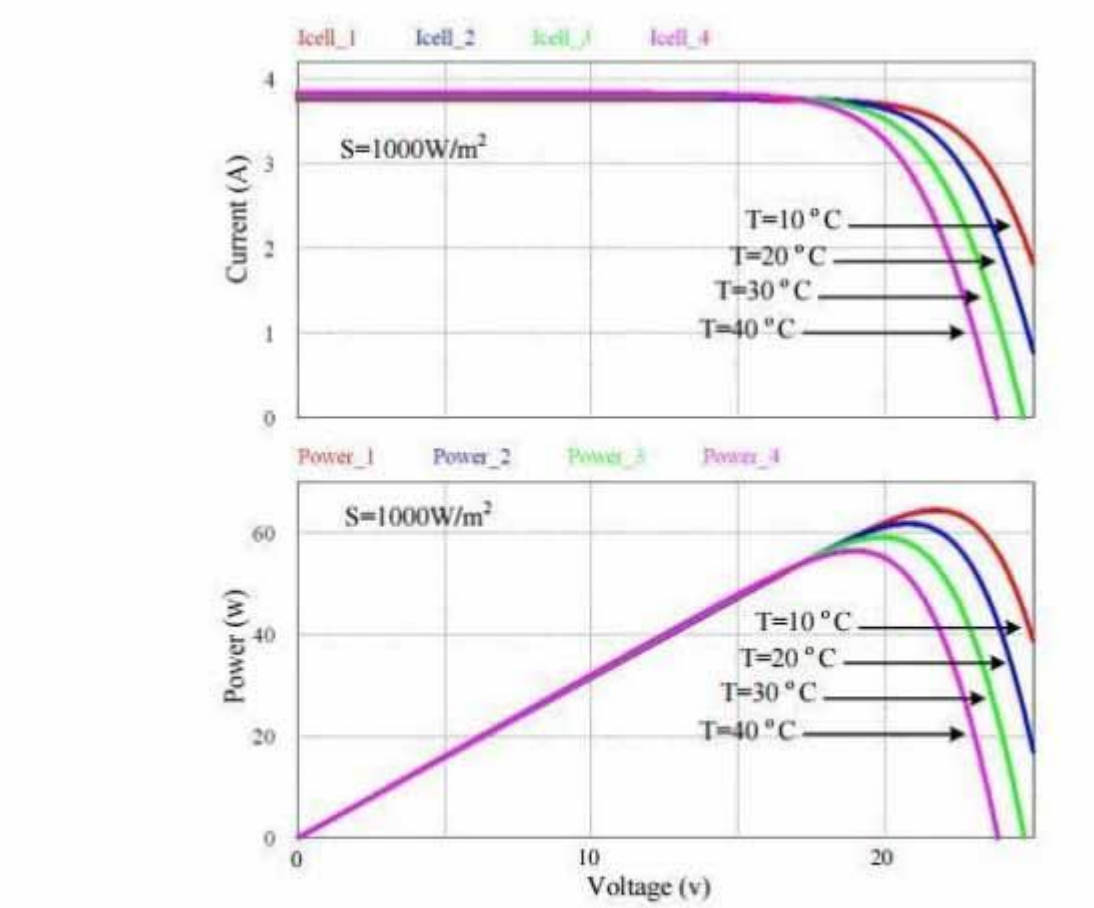
نسبت ماکزیمم توان خروجی سلول به تشعشعات خورشیدی جذب شده شده بر حسب E وات بر متر مربع بر سطح یک ماژول AC,PV تحت شرایط تست STC را راندمان تعریف می‌کنند.

$$\xi = \frac{pm}{E \times AC}$$

تست ها بصورت استاندارد توسط سازندگان در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و مقدار تشعشع $1000\ {}^{W}/_{m^2}$ و طیفی با جرم هوای 105AM.S انجتم می‌شود.

دمای سلول

اثرات دما بر روی عملکرد سلول در شکل زیر مشخص شده است. ولتاژ و جریان سلول که نشان دهنده توان خروجی است با دمای محیط نسبت عکس دارد بعبارت دیگر با افزایش دمای محیط ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد. از نظر بهره برداری افزایش دا کمترین اثر را در جریان خروجی دارد. افزایش دما در نهایت موجب کاهش ولتاژ مدار باز می‌شود.



مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ آرایه خورشیدی در حین تغییرات

در اکثر سلولهای سیلیکون توان خروجی حدود ۰,۵ درصد به ازای هر درجه افزایش دما کاهش میابد و در سلولهای کریستال با راندمان بالا حدود ۰,۳۵ درصد و در سلولهای امورفوس این مقدار بین ۰,۲ تا ۰,۳ است. در طراحی سیستم های سولار در مناطق گرمسیری باید به تغییرات گرمایی نگاه ویژه‌ای داشت.

قرار گرفتن طولانی مدت در معرض حرارت محیط ممکن است سبب تدریجی توان خروجی و تضعیف دائمی و زودهنگام پنل شود. بطور کلی منظور از دمای سلول دمای درونی اتصالات PN است. دمای سلول از سرعت بالا و تشعشات خورشیدی، رطوبت و مشخصات صفحه خورشیدی تاثیر می‌پذیرد. در طراحی سامانه خورشیدی "ضریب دمای سلول" در محاسبه جبرانسازی دما در تشعشعات خورشیدی و همچنین دماهای محیطی استفاده می‌شود.

$T_{CELL}=T_{AMB}+(T_{RISE}*E)$

T_{CELL} دمای سلول بر حسب درجه سانتیگراد

T_{AMB} دمای محیط

T_{RISE} ضریب افرایش دما

E تشعشات خورشیدی بر حسب کیلووات

مثلا در دمای ۳۲ درجه و ضریب دمای ۲۶ درجه و همچنین تشعشع ۱۰۵۰کیلووات بر متر مربع داریم

T_{CEL}= 32+(26*1.05)

ضریب دما

عبارتست از مقدار تغییر ولتاژ یا جریان ناشی از تغییر دما. ضریب دمای منفی به این معنی است که ضریب دما با افزایش دما کاهش میابد و بالعکس.ضرایب دما برای هر ماژول PV و هر کالایی متفاوت است . مثال برای pv سیلیکونی داریم:

ولتاژ = -0.00225 v/c±0.10/c

جریان= 0.0000037 A/c±0.0010% c

ضریب دما برای ولتاژ =C_V=C_{Vcell}×N_s

C_V ضریب دمای مطلق PV بر حسب ولتاژ

C_{Vcell} ضریب دمای مطلق سلول برای ولتاژ

N_s تعداد سلول های سری شده در یک پنل

ضریب دما برای جریان =C_i=C_{icell}×N_P×A

C_{Icell} ضریب دمای مطلق سلول برای جریان

C_I ضریب دمای مطلق PV بر حسب جریان

A سطح سلول بر جسب cm^2

N_P تعداد سلولهای موازی شده

فیل فاکتور

فیل فاکتور مقداری است که مشخصات توان کل را محاسبه می‌کند و بواسطه تعربف زیر عنوان می‌گردد

$$FF=\frac{P_m}{V_{oc}\times I_{sh}}=\frac{\xi\times A_c\times E}{V_{oc}\times I_{sh}}$$

عملکرد مقدار مقاومت شنت و سری بر روی فیل فاکتور بصوذت مستقیم است با افزایش مقاومت شنت و ماهش مقاومت سری باعث افزایش راندمان و فیل فاکتور می‌شود.

استاندارد های راندمان تبدیل انرژی

راندمان تبدیل انرژی در سلول های خورشیدی به چند عامل از جمله شرایط جوی، دمای محیط و اندازه طیف تشعشعات بستگی دارد اما در شرایط تست مرسوم به STC در تابش $1kw/m^2$ و توزیع مشابه طیف عبوری خرشید از اتمسفر (حدودا 1.5 AM) و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام می‌شود.

در این هنگام توسط بار متغییر متصل به پنل حداکثر توان بدست . راندمان در سلولهای مختلف متفاوت است برای مثال راندمان در سلول های سیلیکونی چند پیوندی و در شرایط تست در ازمایشگاه تا ۴۲,۸ درصد می‌رسد در صورتی که در سلول های غیر سیلیکونی ۶ تا ۸ درصد و در سلولهای چند کریستالی حدود ۱۴ الی ۱۹ درصد است.

برای رسیدن به راندمان بالاتر احتیاج بکارگرفتن مواد گرانبهایی از قبیل گالیوم، ارسنید، انیدوم سلنید و هزینه ساخت سلول های چند پیوندی است.

اثرات اقلیمی

انرژی تشعشع یافته از سطح خورشید به شکل نور و گرما در فضا منتشر می‌شود که علاوه بر ان واکنش گداخت هسته ای نیز فوتون های با انرژی بالا ازاد می کند. تابش خورشید با طلوع و غروب خورشید افزایش و کاهش می‌یابد اما تغییرات ان وقتی فاصله زمین از خورشید تغییر می‌کند بیشتر است. مقدار کاهش تشعشع با افرایش فاصله خورشید تا زمین رابطه معکوس دارد $R_a = \frac{R_s}{d^2}$ که در اینجا R_a میزان تشعشعات است و R_s تشعشع منبع یا همان خورشید است. تابش خورشیدی بر حسب وات بر ساعت در نظر گرفته می‌شود بنابراین تابش خورشیدی ظرفیت تولید انرژی خورشیدی یا عملکرد توان خروجی یم سامانه فتوولتایک را تعیین می‌کند. تایش خورشیدی بصورت H=E×t عنوان می‌شود که در ان E تابش خورشیدی (توان بر متر مربع w/m^2) و t زمان بر حسب ساعت و H تشعشع خورشیدی (وات ساعت بر متر مربع wh/m^2) است. برای مثال اگر میزان تابش خورشیدی $900\ w/m^2$ باشد در مدت زمان ۸ ساعت ۷۲۰۰ کیلووات ساعت انرژی تشعشع خورشیدی است.

مقدار توان خورشیدی در فضا حدود $1366\ w/m^2$ است و این در صورتی است که این پرتوها با گذشت از اتمسفر و فیلتر شدن بسیاری از طیف های با انرژی در سطح زمین در حدود $1000w/m^2$ است. تشعشات خورشیدی هنگام برخورد با بخارات اب و دی اکسید کربن و ذرات غبار و گازها متفرق می‌شوند. از عوامل کاهنده دیگر به ابرها و الودگی جو میشود اشاره کرد.

تشعشاتی که به زمین برخورد می‌کنند به دو گروه تقسیم می‌شوند: تشعشات مستقیم و پراکنده که به مجموع اینها تشعشات جهانی گفته می‌شود. تشعشات پراکنده عبارتست از تشعشات انعکاسی یا بازتابشی پرتوهایی مستقیمی که توسط جو بازتابیده می‌شوند. تشعشع مستقیم پرتوهای تابیده خورشید هستند که بدونبرخورد با مانع به سطح تابیده می‌شوند بدون انکه پراکنده شوند. پرتوهای مستقیم بصورت موازی بوده و هنگام برخورد با اشیا سایه تولید می‌کنند.

میزان تشعشعات جهانی در طی روز بین ۱۰ تا ۱۰۰ درصد تغییر می‌کنند. ماژولهای pv تخت پرتوهای جهانی را جذب می کنند ولی در ماژولهای متمرکز کننده تنها تشعشعات مستقیم هدف جذب می‌شوند.

ساعات پیک تابش

هنگامیکه خورشید در نقطه اوج خود قرار دارد توده جو دارای کمترین ضخامت است . زاویه ازیموس به زاویه بین خورشید و خط عمود بر سطح اطلاق می‌گردد. با افزایش زاویه ازیموس پرتوهای عبور کرده با میزان بیشتری از توده ها برخورد کرده و باعث کاهش شدت پرتوها می‌گردد.

در هر نقطه از سطح زمین توده هوا از فرمول زیر محاسبه می‌شود. $AM=\frac{1}{COS\theta_Z}$ که درواقع AM مقدار توده هوا بر حسب زاویه ازیموس بدست می‌اید. اگر خورشید در بالاترین سطح دریا قرار بگیرد مقدار ان AM1 و در خارج جو AM0 است. مقدار فشار توده در سطح دریا ۱۰۱۳ میلی بار می‌باشد در نتیجه توده هوا در هر مکانی بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$AM_{local} = AM \times (P_{local}/1023)$

AM_{local} توده هوای محل

P_{loca} فشار جو در سطح دریا

AM توده هوا در سطح دریا

توده هوا در هر قسمت از زمین را بصورت زیر می‌شود محاسبه کرد

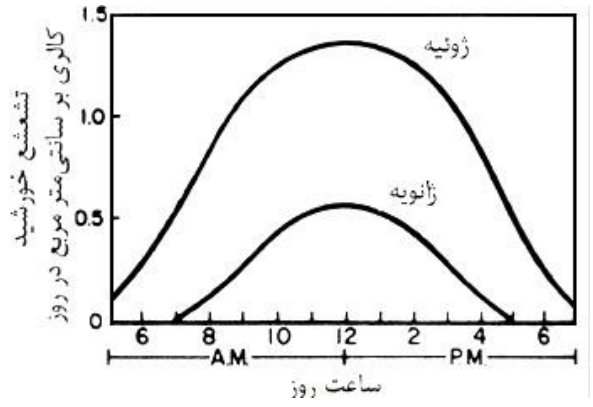
خط کشی با طول مشخص LR عمود بر زمین قرار دهید و سابه انرا بر حسب LS محاسبه کنید. زاویه ازیموس بدست میاید.

$$\theta_Z = A_{rctg}(\frac{LS}{L_R})$$

برای محاسبه ساعات پیک خورشید تعداد ساعات مورد نیاز در طی روز برای یک سامانه برق خورشیدی است تا انرژی را در شرایط پیک بودن خورشید محاسبه کند. برای مثال در یک مکان خاص که تشعشع خورشید در مدت ۷ ساعت برابر $900w/m^2$ است، انرژی ذخیره شده در این مدت برابر است با :

انرژی ذخیره شده $= 900w/m^2 \times 7hrs = 6200wh/m^2$

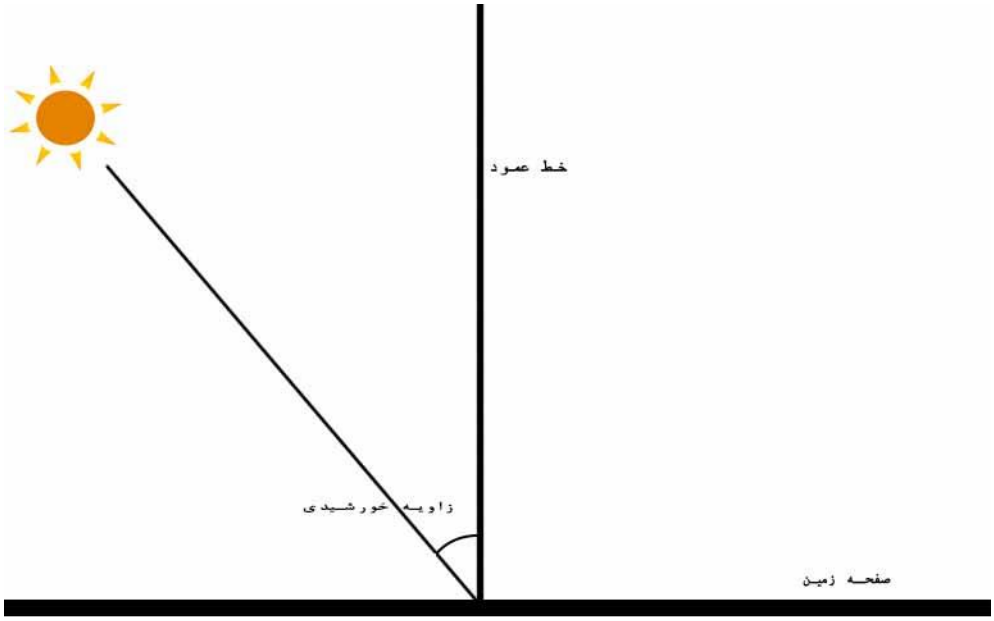
ساعات پیک خورشید $= 6200/1000 = 6.2\ hrs$



تعیین زاویه ازیموس برای بدست اوردن حداکثر توان

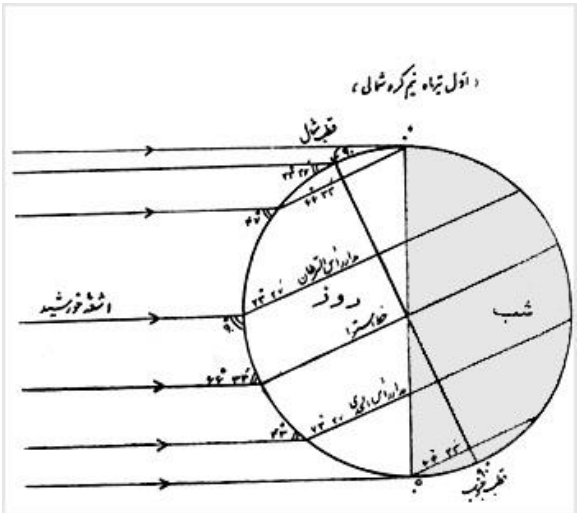
همواره برای جهت یابی باید به زاویه ازیموس و موقعیت جغرافیایی پنل خورشیدی و شرایط جوی که بطرز چشمگیری برروی دریافت پرتوهای دریافت شده تاثیر گذار است توجه داشت. یاقتن زاویه ازیموس مناسب به معنی بدست اوردن ماکزیمم انرژی خورشیدی به ازای عرض جغرافیایی محل است. با توجه به اینکه در تابستان پیک مصرف برق بالاست بهتر است زاویه ازیموس را کاهش دهیم. مسیر حرکت خورشید و زاویه ازیموس در نیمکره شمالی از ماه اردیبهشت تا مهر بیشتر است پس در نتیجه با کاهش زاویه ازیموس بهترین زاویه تابش را در کل سال بدست خواهد امد که در نتیجه در حالی که تعرفه برق در بالاترین میزان است بیشترین توان خروجی را خواهیم داشت.

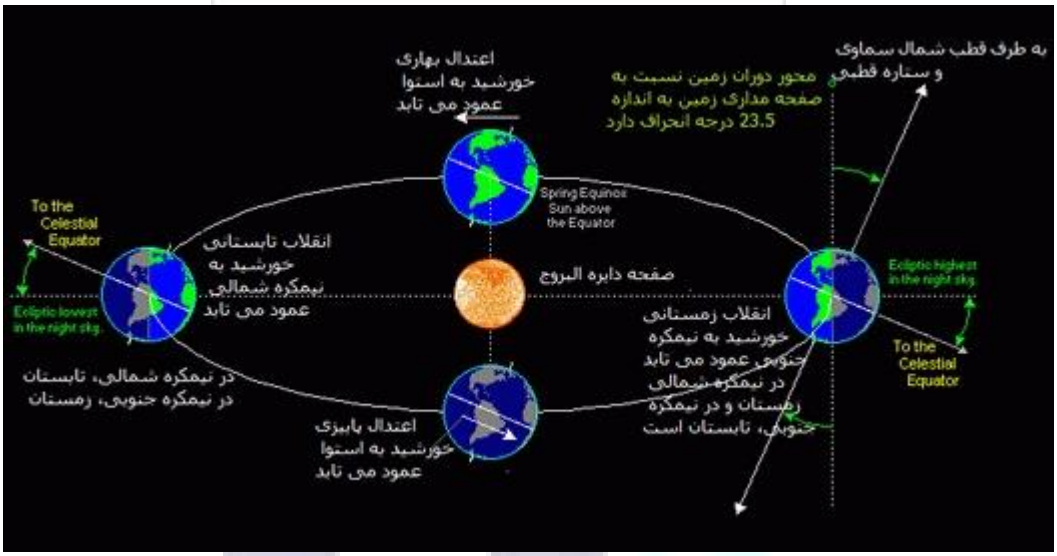
زاویه ازیموس مناسب برای نواحی با عرض جغرافیای کم باید افقی باشد ، این در صورتیست که در ناحیه قطب شمال زاویه ازیمووس باید ۹۰ درجه باشد.



در مسیر حرکت فصلی خورشید در نیمکره شمالی زاویه ازیموس بهینه شبکه خورشیدی رو به جنوب است و پنل ها باید مشرف به شرق یا غرب نصب شود.

حرکت چرخشی زمین به دور خود با تغییر تدریجی از محور ۲۳,۵+ درجه در ماه تیر به زاویه ۲۳,۵- درجه در ماه اذر تبدیل می‌شود . محور زمین در این دو تغییر فصل که به انقلاب زمستانی و تابستانی مرسوم است به صفر درجه می‌رسد.





همچنین زاویه ای که زمین نسبت به خورشید در ظهر یا وسط روز پیدا می‌کند را زاویه ساعت (H) می‌نامند. در ظهر که خورشید عمود بر اشیا می‌تابد زاویه ساعت برابر با صفر است. می‌توان از طریق هندسی و با دانستن زاویه کاهش خورشیدی و زاویه ساعت، نقطه راس زاویه ازیموس را پیدا کرد. نقطه ای که خورشید از دید ناظر بر روی زمین دیده می‌شود زاویه ازیموس و یا زاویه خورشیدی است.

مقدارمتوسط انرژی که خورشید به صورت عمود بر $1m^2$ از سطح زمین می‌تاباند معادل $1000w/m^2$ است.شدت نور از طریق قانون کسینوس لامبرت معلوم می‌شود $I = S \cos z$ که مقدار نور برخورد کرده به سطح پنل را مشخص می‌کند. در تابستان که خورشید مستقیم می‌تابد $z=0$ است در نتیجه $I=S$ می‌شود.

I=S cosz

Z=cos-1 (sinL sinI + cosL cosI cosH)

H=(زاویه ساعت) = 15^{o}×(T-12)

L= عرض جغرافیایی

T= زمان