www.barghnews.com

ارائه روشی جدید برای مدل‌سازی اثر دما در توان و انرژی تولیدی پنل‌های خورشیدی

*و**سعید پیغامی آخوله، *محمدرضا ذوالقدری
*دانشگاه صنعتی شریف، **شرکت یکتا بهینه توان
zolghadr@sharif.edu ,saeed_peyghami@yahoo.com
تهران–ایران

کلمات کلیدی:انرژی تولیدی پنل، بازده پنل، تأثیر دما بر پنل‌های خورشیدی، سیستم‌های فتوولتاییک، مدل‌سازی اثر دما

چکیده

در این مقالهروش جدیدی برای مدلسازی تغییرات دما برای محاسبه انرژی خروجی روزانه پنلهای فتوولتائیک ارائه شده است. بدین منظور ابتدا مدل الکتریکی پنل‌های خورشیدی معرفی شده و تأثیر دما بر روی بازده آن بیان گردیده است. سپس دمای محیط از روی بیشینه و کمینه دما و نیز طول روز، به صورت تجربی و تقریبی مدل شده است. در ادامه برای سه شهر آبادان، اسکو و جرندق انرژی تولیدی این پنل محاسبه گردیده است. خطای مدل ارائه شده با مقدار واقعی انرژی تولیدی در هر مورد به ترتیب 21 و 42 و 8 وات ساعت؛ یعنی حدوداً 2، 2 و 0.8 درصد می‌باشد.

مقدمه

یکی از اجزای اصلی سیستم‌های فتوولتاییک، مبدل انرژی یعنی پنل خورشیدی می‌باشد. برای اینکه این سیستم توان و انرژی مورد نیاز بار مورد نظر را تأمین نماید، بایستی به درستی طراحی شود. یکی از مواردی که در تعیین اندازه پنل مورد نیاز،مؤثر است، بازده آن می‌باشد. بازده پنل به دمای آن ودمای پنل نیز ناشی از دمای محیط و شدت تابش خورشید است[1]. لذا در هر لحظه توان تولیدی پنل به شدت تابش خورشید و دمای محیط وابسته است. انرژی تولیدی پنل نیز جمع توان تولیدی آن می‌باشد. لذا برای محاسبه دقیق انرژی تولیدی پنل لازم است تا در هر لحظه شدت تابش و دمای محیط معلوم باشد. اما اندازه‌گیری دما و شدت تابش در هر لحظه هزینه بالایی دارد و عملاً در بسیاری از مناطق این داده‌ها در دسترس نیست. از طرفی استفاده از بیشینه دما و یا کمینه دما در طراحی ظرفیت پنل، موجب خطا در انتخاب ظرفیت پنل می‌شود و ممکن است منجر به کمبود توان در مواردی و یا زیاد شدن هزینه پنل گردد . این در حالی است که در بسیاری موارد شدت تابش متوسط و دمای کمینه و بیشینه مناطق معلوم است و در اکثر موارد می‌توان از داده‌های مناطق مجاور نیز استفاده نمود.

مدلی که در این راستا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، شدت تابش خورشید را استاندارد و معادل 1000 وات بر متر مربع و دما را بیشینه دمای محیط در نظر می‌گیرند. در این مدل طول روز

www.barghnews.com

معادل شدت تابش خورشید بر حسب کیلووات ساعت بر متر مربع در روز می‌باشد[1 و 3]. خطای این روش نسبت به روش ارائه شده بیشتر است. برای مثال برای آبادان که در بعداً بررسی می‌شود، مقدار واقعی انرژی تولیدی 1022 وات ساعت و مقدار انرژی تخمین زده شده با این مدل 923 وات ساعت می‌باشد. که حدود 10 درصد خطا دارد.

در این مقاله رفتار دمای محیط به صورت تجربی بررسی شده و براساس بیشینه و کمینه دما و طول روز به صورت تقریبی و البته تجربی مدل شده است. در بررسی انجام شده منحنی شدت تابش خورشید در طول روز به صورت کاملاً سینوسی تقریب زده شده است زیرا توان تابشی خورشید رفتار سینوسی دارد. اما چون فرض بر این است که در منطقه مورد نظر توان تابشی، لحظه به لحظه ثبت نشده است، این مقادیر به صورت تقریبی با یک تابع سینوسی شبیه‌سازی می‌شوند. حسن استفاده از این روش در این است که با تعداد کمی اطلاعات ورودی شامل شدت تابش متوسط خورشید و کمینه و بیشینه دما، توان و انرژی تولیدی پنل معلوم می‌شود. لذا محاسبات مورد نظر ساده شده و هزینه اندازه‌گیری داده‌های مورد نیاز به مراتب تقلیل می‌یابد. از طرفی انرژی تولیدی پنل با تقریب نسبتاً خوبی به مقدار واقعی نزدیک می‌شود.

در این مقاله ابتدا مدل الکتریکی پنل‌های خورشیدی معرفی شده و تأثیر دما روی پارامترهای آن بیان می‌شود. سپس رفتار دمای محیط بررسی شده و به صورت تجربی مدل می‌گردد. در ادامه توان تابشی خورشید در طول روز به صورت تقریبی محاسبه می‌شود. در نهایت برای سه شهر اسکو، آبادان و جرندق انرژی تولید یک پنل 235 وات در ماه‌های مختلف، با مدل ارائه شده محاسبه می‌گردد. از طرفی اطلاعات تابش و دمای این سه شهر در بازه‌های 10 دقیقه‌ای که توسط سازمان انرژی‌های نو ایران اندازه‌گیری شده است، موجود است[2]. از روی این داده‌ها مقدار واقعی انرژی تولید محاسبه شده و با مقدار شبیه‌سازی شده مقایسه گردیده است.

پیشینه تحقیق

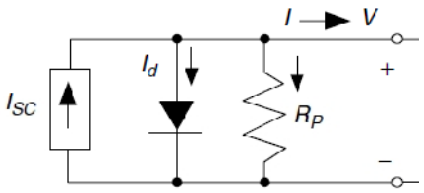
در رابطه با دمای سلولهای خورشیدی و بازده آنها تحقیقات زیادی صورت گرفته است. از جمله King در سال 2004 و Duffie and Beckman در سال 2006 و Skoplaki در سال 2008 دمای سلول‌های خورشیدی را به صورت تابعی از توان تابشی خورشید و دمای محیط مدل می‌کنند[4].

در سال 2009 گیلبرت و الکسیس به بررسی تأثیر دما در انرژی تولیدی پنل‌های خورشیدی پرداخته‌اند. در مدل ارائه شده توسط آنها بازده پنل به صورت خطی با تغییرات دمای محیط متناسب است. اما در دماهای بالا بازده پنل افت بیشتری پیدا می‌کند[5].

در این مقاله به مدلسازی تأثیر دما روی بازده و انرژی تولیدی پنل پرداخته شده است.

مشخصه الکتریکی پنل‌های خورشیدی

مشخصه خروجی سلول‌های خورشیدی که با یک منبع جریان و دیود معکوس مطابق شکل 1 زیر مدل می‌شوند، به شدت به دما بستگی دارد[1]. پارامترهای پنل‌های خورشیدی در شرایط STC[1] بیان می‌شود. تحت این شرایط شدت تابش خورشید W/m2 1000 دمای محیط 25 درجه سانتیگراد و سرعت باد m/s 1 می‌باشد[1]. لذا توان نامی، ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و بازده در این شرایط به عنوان پارامترهای هر پنل بیان می‌شود. برای مثال مشخصات یک نوع پنل 235 وات در جدول 1 آمده است[6].



شکل 1 مدار معادل سلول خورشیدی[1]

ضرایب افت ولتاژ، جریان و توان، تغییرات این کمیت‌ها با تغییر دمای سلول را بیان می‌کنند. لذا با افزایش دمای سلول، ولتاژ مدار باز افت می‌کند، جریان اتصال کوتاه زیاد می‌شود. اما توان که حاصل ضرب این دو کمیت است، با افزایش دما، کاهش می‌یابد. در شکل 2 مشخصه سلول خورشیدی نوعی و تأثیر دما در هر یک از پارامترهای گفته شده نشان داده شده است[1].

[1] Standard Test Conditions

www.barghnews.com

جدول 1 مشخصات اکتریکی یک نوع پنل خورشیدی 235 وات[6]

Maximum power (Pmax)	235 W
Tolerance of Pmax	10%/-5%
Open circuti Voltage (Voc)	37.2 V
Maximum Power Voltage (Vpm)	30.1 V
Short Circuit Current (Isc)	8.59 A
Maximum Power Current (Ipm)	7.81 A
Module Efficiency (%)	14.40%
NOCT	47.5 'C
Temprature Coefficient (Pmax)	-0.485%/'C
Temprature Coefficient (Voc)	-0.36%/'C
Temprature Coefficient (Isc)	0.053%/'C
Dimensions	994*1640*46 mm

توان خروجی پنل خورشیدی در شرایط STC

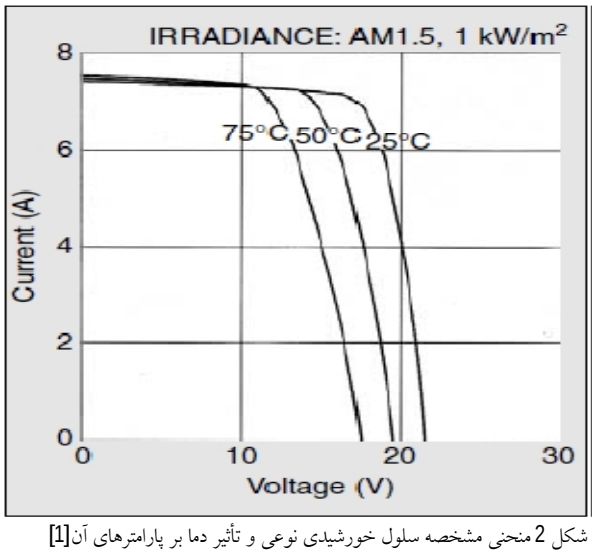
یک پنل به مساحت A و بازده ماژول n در نظر بگیرید. توان خروجی این پنل در شرایط استاندارد (STC) که توان نامی نامیده می‌شود، برابر است با[5]:

$$P_{rated}=A.\eta.1000 \text{ (Watts)} \quad (1)$$

برای مثال در پنلی که مشخصات آن در جدول 1 آورده شده است، توان نامی تحت شرایط STC برابر است با:

$$P_{rated}=(0.994\times1.64)\times14.4\times1000=235 \text{ Watts}$$

این توان همانطور که گفته شد توان نامی پنل می‌باشد.



شکل 2 منحنی مشخصه سلول خورشیدی نوعی و تأثیر دما بر پارامترهای آن[1]

دمای سلول های خورشیدی

دمای سلول های خورشیدی تابعی از دمای محیط و شدت تابش خورشید است. با افزایش دمای محیط دمای سلول نیز بیشتر می‌شود. از طرفی با افزایش شدت تابش خورشید نیز سلول گرم شده و دمای آن بیشتر می‌شود. دمای سلول‌های خورشیدی در شرایط محیطی مختلف با دمای محیط T_{amb} و شدت تابش R از رابطه تقریبی 2 بدست می‌آید[1].

$$T_{cell}=T_{amb}+[(NOCT-20)/800]\times R \quad (2)$$

دمای سلول وقتی دمای محیط20 درجه سانتیگراد و شدت تابش 800 W/m^2 و سرعت باد 1 m/s است برابر NOCT[1] می‌باشد[1]. این کمیت به عنوان پارامترهای پنل در برگه اطلاعات آن داده می‌شود، در پنل نمونه جدول 1 این مقدار 47.5 درجه سانتیگراد است.با توجه با رابطه فوق با افزایش دمای محیط، دمای سلول بیشتر می‌شود.

بنابراین دمای سلول به صورت مستقیم با دمای محیط و شدت تابش خورشید در ارتباط است.

توان خروجی پنل خورشیدی در حالت کلی

همانطور که گفته شد توان خروجی پنل با تغییرات دمای سلول تغییر می‌کند. ضریب تغییر دمای توان (γ) برای پنل‌های مختلف متفاوت بوده و به عنوان یکی از پارامترهای آن از طرف کارخانه سازنده اعلام می‌شود. توان خروجی پنل در شرایطی غیر از شرایط STC در دمای T_{cell} وشدت تابش R به صورت رابطه 3 قابل محاسبه است[5].

$$P_{out}=R\times A\times n= R\times A\times\eta_{rated}\times(1-\gamma\Delta T) \quad (3)$$

$$\Delta T=T_{cell}-25 \quad (4)$$

Prated توان پنل در شرایط استاندارد است که توسط سازنده معرفی می‌شود و از رابطه 1 قابل محاسبه است.

بازده پنل‌های خورشیدی

بازده به عنوان یکی از پارامترهای هر محصولی عبارت است از نسبت توان خروجی به ورودی. در مورد پنل‌های خورشیدی نیز بازده به صورت نسبت توان خروجی به توان ورودی تعریف می‌شود. توان ورودی پنل همان توان دریافتی از خورشید می‌باشد. برای پنل توصیف شده در جدول1 توان ورودی در شدت تابش R و دمای 25 درجه سانتیگراد برابر است با[5]:

$$P_{in}=R\times A \quad (5)$$

که در شرایط استاندارد (STC) برابر است با:

[1]Nominal Operating Cell Temprature

$P_{in}=(1000\ W/m^2)\times(.994\times1.64\ m^2)=1630\ Watts$

از طرفی توان خروجی پنل در شرایط استاندارد مطابق جدول1 برابر 235 وات است. بنابراین بازده پنل توصیف شده در شرایط استاندارد، به صورت رابطه 6 قابل محاسبه است[5].

$$\eta_{rated}=P_{out}/P_{in} \quad (6)$$

$$\eta_{rated}=235/1630=14.4\%$$

با جایگذاری رابطه 3 و 5 در رابطه 6 داریم:

$$\eta=\eta_{rated}\times(1-\gamma\Delta T) \quad (7)$$

با جایگذاری روابط 4 و 2 در رابطه 7 داریم:

$$\eta=\eta_{rated}\times[1-\gamma(T_{amb}+(NOCT-20)/800\times R-25)] \quad (8)$$

بازده پنل گفته توصیف شده در شدت تابش R و دمای T_{amb} برابر است با:

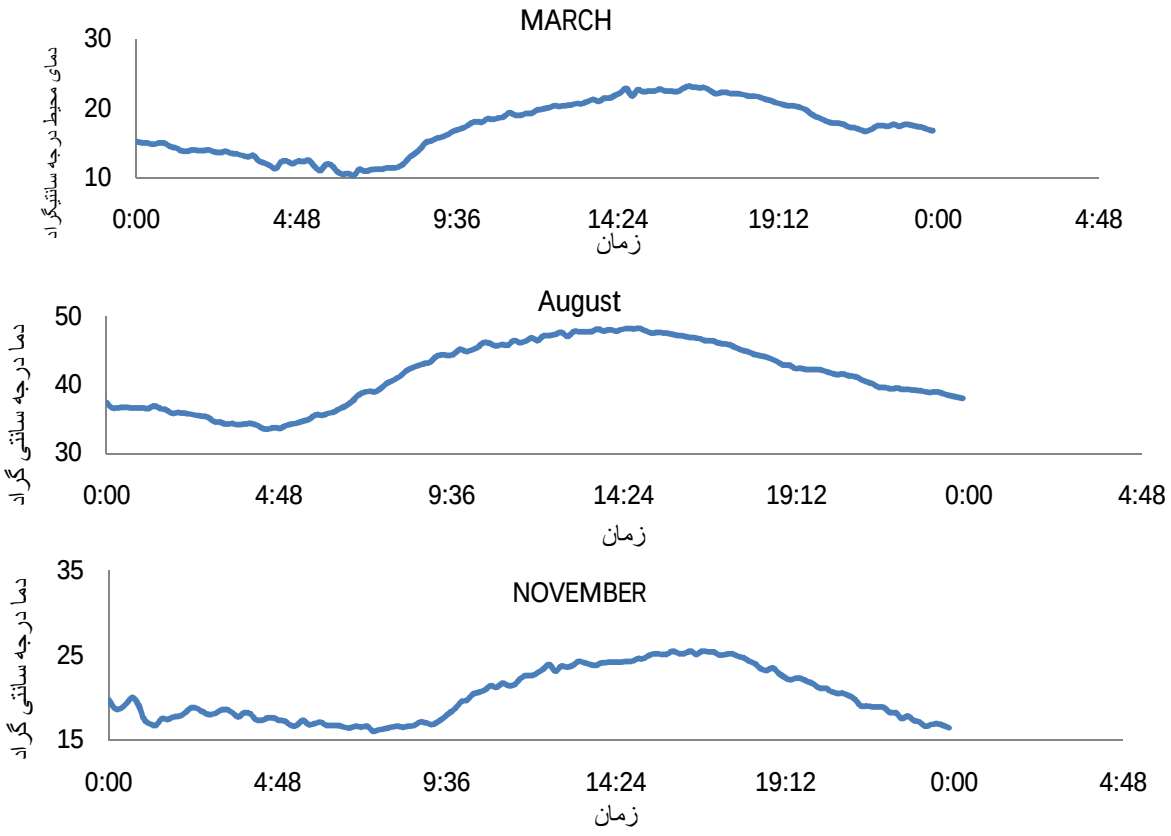
$$\eta=14.4[1-0.00485(T_{amb}+0.0344R-25)]$$

رابطه 9 در واقع بازده پنل را در دمای محیط مدل می‌کند.

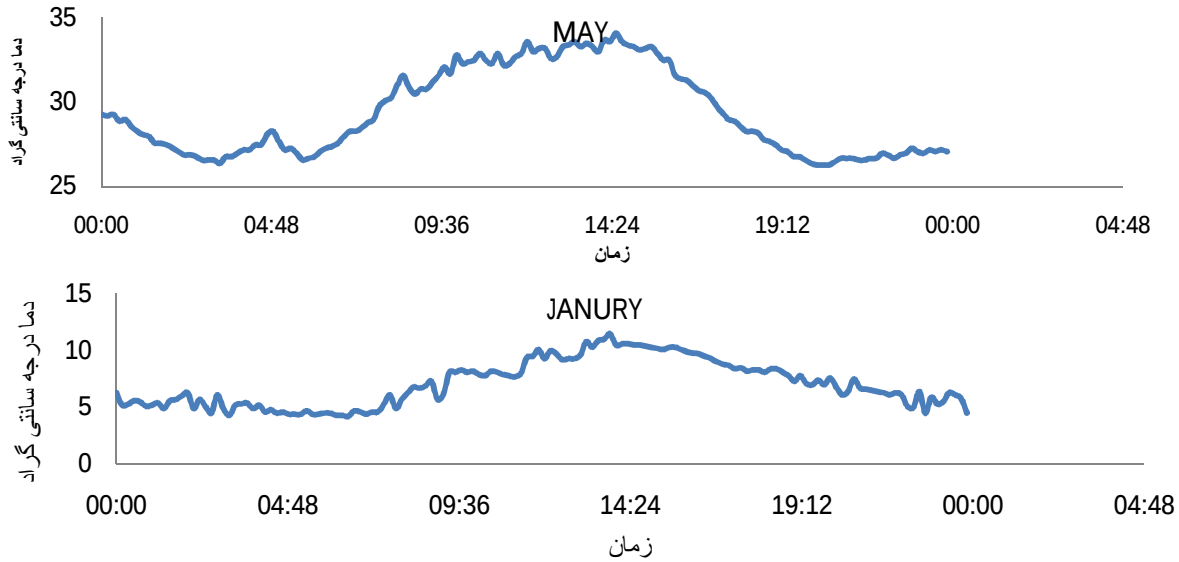
رفتار دمای محیط

همانطور که گفته شد، دما سلول تابع دمای محیط است. دمای محیط اطراف زمین با تابش خورشید افزایش می‌یابد. رابطه ریاضی بین دمای محیط و شدت تابش وجود ندارد. اما چون از انتهای شب تا موقع طلوع آفتاب، مقدار بیشتری از انرژی جذب شده توسط زمین و ذرات موجود در هوا از جو زمین خارج می‌شود. بعد از طلوع آفتاب، دمای محیط تحت تأثیر گرمای خورشید افزایش می‌یابد. بنابراین از نظر فیزیکی، کمترین دمای محیط هنگام طلوع آفتاب اتفاق می‌افتد. مطالعه دمای اندازه‌گیری شده در 24 ساعت در نقاط مختلف کره زمین نشان می‌دهد که دما از موقع طلوع آفتاب شروع به افزایش می‌کند و تا نزدیک غروب آفتاب زیاد می‌شود و 2 الی 3 ساعت قبل از غروب آفتاب به اوج خود می‌رسد و پس از آن کاهش یافته و نزدیک طلوع خورشید به کمینه خود می‌رسد. اما روند افزایش و کاهش دما در ساعات مختلف خطی نیست و به نوع و میزان ذرات موجود در هوا و میزان ابری بودن هوا و عوامل دیگر بستگی دارد. شکل‌های 3 و 4 و 5 رفتار دمای محیط را در سه شهر مختلف کشور نشان می‌دهد[7].

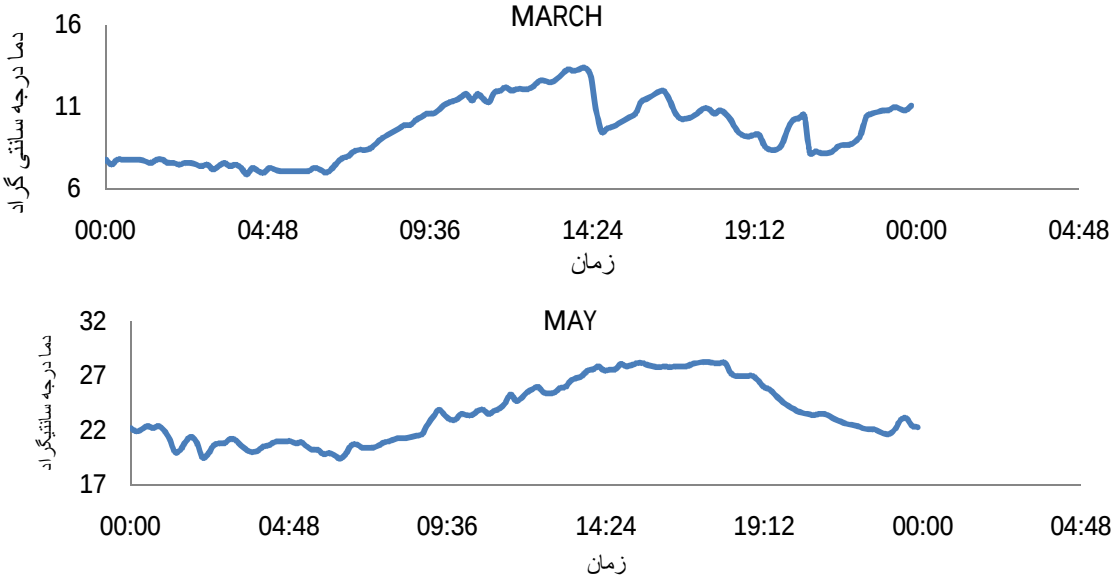
با توجه به نمودارهای زیر که دمای محیط را در یک روز مشخص از ماههای مختلف نشان می‌دهد[2]، می‌توان دما را به صورت شکل 6 مدل کرد.



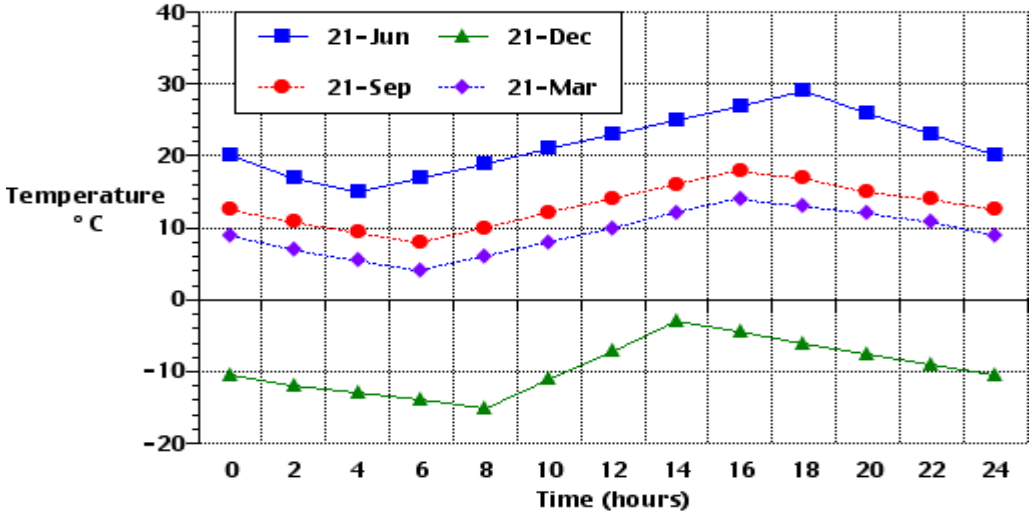
شکل 3 دمای محیط در سه ماه مختلف در شهر آبادان[2]



شکل 4 دمای محیط در دو ماه مختلف در شهر سمنان[2]



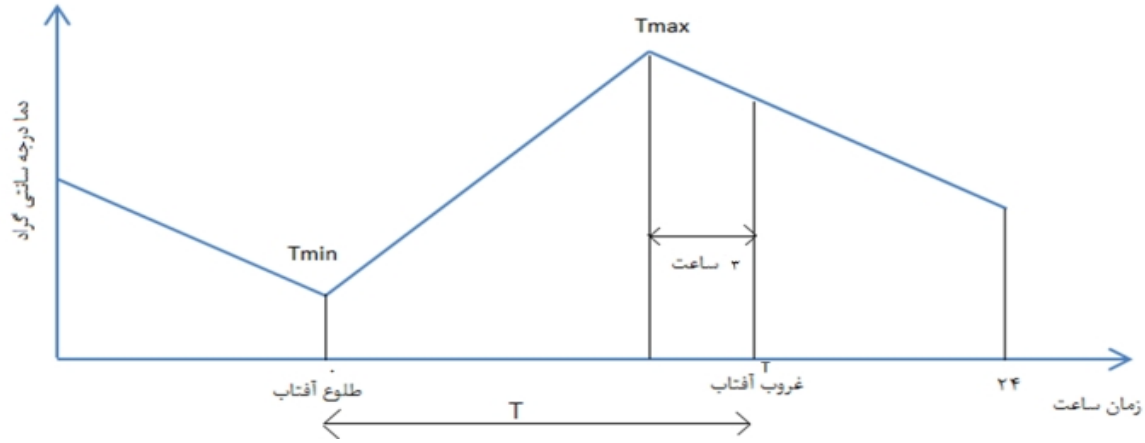
شکل 5 دمای محیط در دو ماه مختلف در شهر اسکو[2]



شکل 6 تغییرات دمای محیط در طول روز در چند ماه مختلف[2]

همان طور که گفته شد کمترین دما در هنگام طلوع آفتاب اتفاق می‌افتد. اما بیشترین دما بعد از ظهر خورشیدی و نزدیک غروب آفتاب اتفاق می‌افتد. لیکن زمان آن به صورت دقیق مشخص نیست. به صورت تقریبی می‌توان گفت که در زمستان‌ها 2 الی 3 ساعت قبل از غروب خورشید و در تابستان ها 3 الی 5 ساعت قبل از غروب خورشید اتفاق می‌افتد و به طور میانگین می‌توان 3 الی 4 ساعت قبل از غروب خورشید در نظر گرفت.

بنابراین اگر میانگین بیشینه و کمینه دمای محیط در یک ماه مشخص باشد، با توجه به اینکه طول روز در هر نقطه و در هر زمانی تابعی از زمان و مکان آن نقطه است، می‌توان معادله دما بر حسب زمان را بدست آورد. اگر متوسط طول روز را در یک ماه، T و متوسط بیشینه دما را T_{max} و کمینه دما را T_{min} در نظر بگیریم و فرض کنیم که بیشینه دما 3 ساعت قبل از غروب آفتاب اتفاق می‌افتد، در این صورت منحنی دما در 24 ساعت به صورت شکل 7 بوده و معادله آن به صورت روابط 10 در می‌آید.



شکل 7 مدل سازی دمای محیط از روی متوسط بیشینه و کمینه دما

$$Temp = \frac{Tmax-Tmin}{T-3}.t + Tminsunrise < t < sunset-3$$
$$Temp = \frac{Tmin-Tmax}{24-(T-3)}.(t-(T-3)) + Tmaxsunset-3 < t < sunset \qquad 10$$

در روابط 10 طلوع خورشید مبدأ زمان در نظر گرفته شده است و T متوسط طول روز در هر ماه می‌باشد، که از رابطه زیر قابل محاسبه است[1].

$$L = 2\left(\frac{H_{SR}}{15^{o}/_{h}} + Q\right) \qquad 11$$

$$\delta = 23.45\sin\left(\frac{360}{365}(n-81)\right) \qquad 12$$

$$H_{SR} = \cos^{-1}(-tanLtan\delta) \qquad 13$$

$$Q = \frac{3.467}{cosLcos\delta sinH_{SR}}(\min) \qquad 14$$

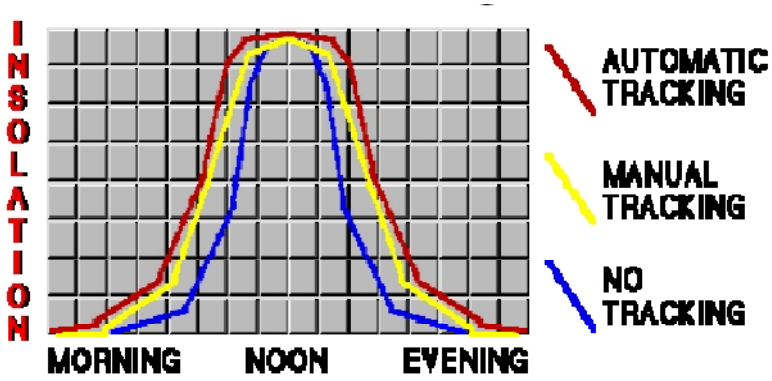
در روابط فوق L عرض جغرافیایی منطقه و n فاصله روز وسط ماه از اول سال میلادی می‌باشد، برای مثال عدد n برای ماه آگوست برابر 229 است.

با توجه به اینکه دمای محیط به صورت تابعی از بیشینه و کمینه دما و طول روز در می‌آید، می‌توان بازده پنل را به صورت واقعی مدل نمود. در واقع در هر ساعتی از روز می‌توان دما را از روی مدل گفته شده بدست آورد و از روی رابطه 8 بازده پنل را در آن ساعت تعیین کرد.

رفتار شدت تابش خورشید در طول روز

توان دریافتی توسط پنل در طول روز متغیر است و به منطقه جغرافیایی و موقعیت خورشید در ساعات مختلف بستگی دارد. از آنجا که مسیر حرکت خورشید در طول روز به صورت سینوسی تغییر می‌کند، شدت تابش خورشید نیز به صورت سینوسی تغییر خواهد کرد[1]. در شکل 8 میزان توان تابشی خورشید در ساعات مختلف در یک روز صاف و بدون ابر نشان داده شده است[8].

در شکل 8 منحنی آبی رنگ شدت توان دریافتی توسط پنل ثابت را نشان می‌دهد. رابطه توان دریافتی و موقعیت جغرافیایی منطقه در ساعات مختلف روز پیچیده می‌باشد. از طرفی در بسیاری از مناطق اطلاعات شدت تابش در هر لحظه موجود نیست (ثبت نشده است)، اما شدت تابش متوسط در هر روز و یا در هر ماه معلوم است. مثلاً اطلاعات موجود در ناسا که متوسط شدت تابش خورشید را در ماه‌های مختلف در 22 سال اخیر را شامل می‌شود.



شکل 8 رفتار شدت تابش خورشید در طول روز[8]

مدل تقریبی شدت تابش در طول روز

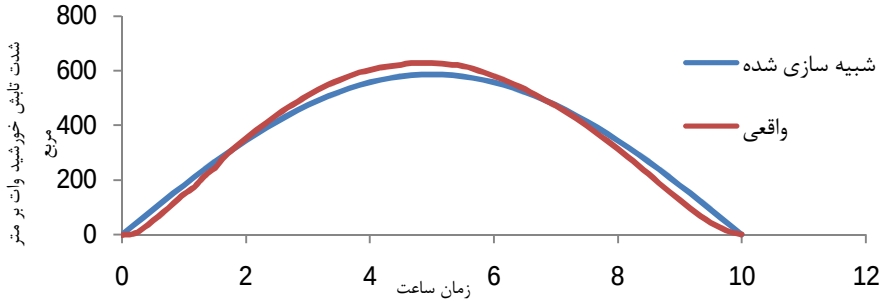
همانطور که گفته شد متوسط شدت تابش خورشید در هر ماه مشخص می‌باشد. حال متوسط شدت تابش را به عنوان شدت تابش در هر روز از یک ماه در نظر می‌گیریم و طول روزهای ماه را ثابت و برابر طول روز در وسط ماه فرض می‌کنیم. شدت تابش خورشید را نیز سیسنوسی کامل با دوره تناوب دو برابر طول روز در نظر می‌گیریم. در این صورت با مساوی قرار دادن انرژی دریافتی در طول روز (شدت تابش متوسط خورشید در ماه) و انرژی حاصل از شبیه سازی تابش با شکل موج سینوسی، دامنه شکل موج تابش خورشید به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$A = \frac{500\pi I}{T} \qquad 15$$

در رابطه فوق I شدت تابش خورشید برحسب $(KW/m^2.day)$ و T طول روز بر حسب ساعت می‌باشد. در این صورت شدت تابش خورشید در طول روز به صورت رابطه 16 در می‌آید.

$$R = A.Sin(\frac{\pi}{T}t) \qquad 16$$

بنابراین با داشتن متوسط شدت تابش در هر ماه و با فرض‌های بیان شده، توان تابشی خورشید در هر لحظه از روز به صورت رابطه 16 قابل محاسبه است. در شکل زیرتوان تابشی واقعی[2] و شبیه سازی شده با رابطه فوق مقایسه شده‌اند.



شکل 9 مدل سازی رفتار شدت تابش خورشید در طول روز

مزایای مدل ارائه شده:

الف- در این مدل سازی، انرژی روزانه حاصل از تابش خورشید با مقدار واقعی برابر است. (سطح زیر دو نمودار فوق)

ب- در مدل واقعی نیاز به ثبت شدت تابش و دما در ساعات مختلف است، اما در مدل ارائه شده، فقط متوسط تابش خورشید نیاز است و تابش در ساعات مختلف از رابطه 16 بدست می‌آید. همچنین از روی دمای کمینه و بیشینه، دما در ساعات مختلف مدل می‌شود. اطلاعات مورد نیاز در این مدل عبارتنداز:

- متوسط شدت تابش خورشید در ماه؛
- متوسط کمینه دما در ماه؛
- متوسط بیشینه دما در ماه؛

پ- در محاسبه انرژی تولیدی واقعی نیاز به انتگرال گیری حاصلضرب دما و شدت تابش می‌باشد(رابطه 3)، در این مدل محاسبات ممکن و بسیار ساده می‌گردد.

ت- هزینه ثبت و نگهداری داده‌ها و زمان لازم برای این کار نیز از بین می‌رود.

معایب این مدل:

الف- این مدل برای روزهای صاف و بدون ابر درست است. در صورتیکه در شرایط ابری شدت تابش کاهش می‌یابد. لذا انرژی دریافتی از خورشید کاهش می‌یابد. اما از آنجایی که در محاسبه دامنه آن از متوسط شدت تابش ماهانه استفاده شده است این کاهش انرژی زیاد مشهود نیست. از طرفی در طراحی سیستم‌های خورشیدی متوسط شدت تابش در نظر گرفته می‌شود. و برای شرایط ابری و پدیده‌ها، جهت تأمین کمبود انرژی از باتری استفاده می‌شود.

ب- در ابتدا و انتهای روز شدت تابش کمتر از مقدار شبیه سازی شده است. در مقابل شدت تابش در هنگام ظهر بیشتر از مقدار شبیه سازی شده است. از نظر میزان انرژی این دو مورد برابر هستند. اما وقتی انرژی خروجی پنل مد نظر است، چنان که گفته شد، این کمیت تابعی از دما و شدت تابش می‌باشد، که در عمل حاصل ضرب این دو کمیت در محاسبه انرژی بکار گرفته می‌شود. لذا اگرچه شدت تابش شبیه سازی شده از مقدار واقعی هنگام صبح و عصر بیشتر و هنگام ظهر کمتر است، اما رفتار دما در این دو بازه کاملاً متفاوت است. اما چون رفتار دقیق دما (رابطه ریاضی آن) مشخص نیست این خطا قابل قبول است و از آنجا که این دو تفاوت از نظر عددی با هم برابر هستند و توان تابشی هنگام صبحو عصر کم است، خطای ایجاد شده در عمل کمتر می‌باشد.

بررسی دقت مدل ارائه شده

برای بررسی دقت مدل فوق، ابتدا میزان دقیق انرژی تولیدی از روی اطلاعات موجود محاسبه می‌شود. یعنی با استفاده از داده‌های دما و تابش اندازه گیری شده توسط سانا، که در بازه‌های 10 دقیقه‌ای موجود است، مقدار توان و انرژی تولیدی تعیین می‌گردد. سپس از روی داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل ارائه شده، انرژی تولیدی محاسبه شده و با مقدار با مقدار واقعی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

1- محاسبه دقیق انرژی تولیدی

برای محاسبه دقیق متوسط انرژی تولیدی در روز، باید اطلاعات دقیق تابش و دما در ساعات مختلف موجود باشد. سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، در ایستگاه‌های بادسنجی نصب شده در نقاط مختلف کشور، دما و شدت تابش را در آن مناطق در چند سال اخیر ثبت کرده است. در این قسمت برای محاسبه دقیق انرژی تولیدی از اطلاعات سانا استفاده می‌کنیم. همانطور که گفته شد، این اطلاعات دما و تابش خورشید را در بازه‌های 10 دقیقه‌ای در تمام روزهای سال شامل می‌شود.

اگر توان تابشی را در بازه iام، R_i و دمای محیط را T_i بنامیم، در این صورت با توجه به رابطه 3 و 5 و 8، توان تولیدی پنل با سطح A در این بازه مطابق رابطه 16 قابل محاسبه است.

$$P_i=R_i\times A\times\eta_{rated}\times[1-\gamma(T_i+(NOCT-20)/800\times R_i-25)] \quad 16$$

لذا انرژی تولیدی در 24 ساعت از صورت رابطه 17 بدست می‌آید:

$$E=\sum_{i=1}^{24\times6}P_i\times\Delta t=\sum_{i=1}^{144}P_i\times\frac{10min}{60min}=(\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{144}P_i) \quad 17$$

2- محاسبه انرژی تولیدی با مدل ارائه شده

در این حالت ابتدا شدت تابش و دما براساس روابط 16 و 10 مدل شده و توان تولیدی از رابطه 18 بدست می‌آید. سپس انرژی تولیدی در با انتگرال گیری از رابطه 18به صورت رابطه 19 قابل محاسبه است.

$$P(t)=R\times A\times\eta_{rated}\times[1-\gamma(T+(NOCT-20)/800\times R-25)] \quad 18$$

که در آن R از رابطه 16 و T از رابطه 10 بدست می‌آید.

$$E = \int_{sunrise}^{sunset} P(t).dt \qquad 19$$

مورد کاوی 1

در این قسمت، متوسط انرژی خروجی یک عدد پنل 235 وات را برای آبادان در ماه مارس یک‌بار با مدل ارائه شده و یک‌بار به صورت دقیق محاسبه می‌کنیم.

1- روش دقیق: در این روش از اطلاعات دما و توان تابشی خورشید سانا که در بازه‌های زمانی 10 دقیقه‌ای در طول ماه مارس اندازه‌گیری شده است،استفاده شده است. از روی رابطه 3 توان خروجی پنل را در هر بازه زمانی 10 دقیقه‌ای در طول ماه محاسبه می‌کنیم. سپس با جمع توان‌های تولیدی و میانگین‌گیری انرژی، متوسط انرژی تولیدی در هر روز به دست می‌آید. با انجام محاسبات، انرژی تولیدی روزانه برای آبادان در ماه مارس با استفاده از یک پنل 235 وات 1022 وات-ساعت به دست می‌آید.

2- مدل ارائه شده: متوسط بیشنه و کمینه دما، طول روز و شدت تابش خورشید در ماه مارس در جدول 2 آمده است.

جدول 2 اطلاعات هواشناسی آبادان در ماه مارس[2]

کمیت	مقدار
کمینه دما	14
بیشینه دما	27
شدت تابش	4.77
طول روز(Hr)	12

بنابراین شدت توان تابشی خورشید در طول روز در هر لحظه برابر است با:

$$R = \frac{500\pi I}{T}.Sin\left(\frac{\pi}{T}t\right) = \frac{500\pi \times 4.77}{12}.Sin\left(\frac{\pi}{12}t\right) = 624.4Sin(0.26t) \qquad 23$$

و دمای روزانه با توجه به رابطه 10 در هر لحظه برابر است با:

$$\begin{aligned} T &= 1.44t + 14 && 0 < t < 12 - 3 \\ T &= -0.87t + 34.83 && 12 - 3 < t < 12 \end{aligned} \qquad 24$$

با جایگذاری روابط فوق در رابطه 9 و 3 و انتگرالگیری از رابطه حاصل، متوسط روزانه انرژی تولیدی در ماه مارس بدست می‌آید. برای این مورد که اطلاعات لازم در جدول فوق آمده است انرژی روزانه محاسبه شده با کامپیوتر برابر 1043 وات ساعت می‌باشد.

بنابراین اختلاف مدل ارائه شده با مقدار واقعی 21 وات ساعت یعنی حدود 2 درصد می‌باشد.

مورد کاوی 2

در این مورد به تخمین انرژی تولیدی با مدل‌های مختلف برای شهر اسکو در ماه ژوئیه می‌پردازیم. در جدول 3 متوسط ماهانه کمیت‌های هواشناسی مورد نیاز آورده‌شده است.

جدول 3 اطلاعات هواشناسی اسکو در ماه ژوئیه[2]

کمیت	مقدار
کمینه دما	18
بیشینه دما	30
شدت تابش	10.1
طول روز(Hr)	14.5

در این مورد مقدار انرژی تولیدی توسط پنل 235 توصیف شده برابر 1987 وات ساعت و مقدار شبیه سازی شده نیز برابر 2029 وات ساعت است. اختلاف مقدار واقعی و مدل شده 42 وات ساعت و در حدود 2 درصد می‌باشد.

موردکاوی 3

در این مورد به تخمین انرژی تولیدی با مدل‌های مختلف برای شهر جرندق در ماه نوامبر می‌پردازیم. در جدول 4 متوسط ماهانه کمیت‌های هواشناسی مورد نیاز آورده‌شده است.

در این مورد مقدار انرژی تولیدی توسط پنل 235 توصیف شده برابر 972 وات ساعت و مقدار شبیه سازی شده نیز برابر 980 وات ساعت است. اختلاف مقدار واقعی و مدل شده 8 وات ساعت و در حدود 0.8 درصد می‌باشد.

جدول 4 اطلاعات هواشناسی جرندق در ماه نوامبر[2]

کمیت	مقدار
کمینه دما	-2
بیشینه دما	9
شدت تابش	4.13
طول روز(Hr)	10.33

نتیجه گیری

1- در بررسی سه موردکاوی برای سه منطقه در سه ماه مختلف با شرایط آب و هوایی متفاوت، میزان دقت و صحت مدل به کار گرفته شده زیاد بوده و خطای ایجاد شده کم و در حدود 2 درصد است. برای مثال در آبادان با پنل 235 وات توصیف شده انرژی تولیدی واقعی 1022 وات ساعت و انرژی تولیدی شبیه سازی شده 1043 وات ساعت می‌باشد. بنابراین مدل ارائه شده یک مدل مناسبی می‌باشد.

2- اطلاعات آماری مورد نیاز در این مدل نسبت به محاسبه واقعی کم می‌باشد. در واقع تنها پارامترهای مورد نیاز، بیشینه و کمینه دما و شدت تابش متوسط خورشید است. لذا نیازی به اندازه‌گیری لحظه به لحظه داده‌ها نیست.

3- نیاز به داده کم هزینه اندازه‌گیری دقیق برای داشتن اطلاعات لحظه‌ای و زمان لازم برای این‌کار را از بین می‌برد.

4- این مدل یک روش مناسب برای طراحی دقیق سیستم‌های فتوولتاییک است. اساس اکثر طراحی‌های موجود، بیشینه دما و تابش استاندارد می‌باشددر واقع فرض برآن است که پنل همیشه در دمای ماکزیمم قرار دارد و این باعث کاهش بازده آن می‌شود، که در عمل چنین نیست. در این مدل علیرغم اینکه داده‌های لحظه‌ای موجود نیست، اما این داده‌ها شبیه‌سازی می‌شوند و با تقریب خوبی به جواب واقعی نزدیک هستند.

مراجع

[1]: Gilbert M. Masters, "Renewable and Efficient Electric PowerSystems", Stanford University, A JOHN WILEY & SONS, INC.,2004

[2]: http://www.suna.org.ir/ationoffice-windenergyoffice-windamar-fa.html/ Last Seen 25/5/1390;

[3]: http://www.leonardo-energy.org/, Last Seen 12/3/1390;

[4]: John A.Duffie, "Solar Engineering Of Thermal Processes"University of Wisconsin, Second Edition, Wiley, 1991;

[5]: Tomasz Kozak, "Influence of Ambient Temperature on the Amount of Electric Energy Produced by Solar Modules", 16th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems", June 25-27, 2009;

[6]: **کاتالوگ پنل 235 وات شارپ؛ بر گرفته از سایت** www.sharpusa.com/solar؛

[7]:http://www.eoearth.org/article/Daily_and_annual_cycles_of_temperature/lastSeen 12/4/1390;

[8]: **نشریه سازمان انرژی‌های نو ایران، پیام سانا، شماره 10، اردیبهشت 1388؛**