

تحلیل شیب و آزمون بهینه برای نصب پنل فتوولتاییک براساس تابش دریافتی خورشید در شهرستان کاشان

دریافت مقاله: ۹۶/۷/۹ پذیرش نهایی: ۹۶/۱۲/۱۱

صفحات: ۷۴-۵۹

علیرضا رحیمی: استادیار پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان.^۱

rahimi2@kashanu.ac.ir

علیرضا کربلایی درئی: دانشجوی دکتری اقلیم شناسی دانشگاه خوارزمی تهران.

karbalaee20@gmail.com

محمد رضا کربلایی: دانشجوی کارشناسی ارشد لیزر دانشگاه شهید بهشتی تهران.

karbalaee30@gmail.com

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، تعیین راستای استقرار و شیب بهینه برای نصب پنل فتوولتاییک در شهرستان کاشان می باشد که برای این منظور با استفاده از موقعیت جغرافیایی منطقه، روابط و مدل فیزیکی Masters Gilbert تابش دریافتی خورشید بر سطح پنل، محاسبه شد، نتایج این پژوهش نشان میدهد که میزان تابش دریافتی بر سطح کلکتور در راستای جنوب و در شیب های مختلف، در ۶۴ درصد از مواقع سال، بیشتر از تابش روی سطح پنل نصب شده در راستای جنوب شرق یا غرب با زاویه شیب های مختلف است. بیشترین میزان تابش در آزمون رو به جنوب در شیب ۳۰ و ۴۰ درجه می باشد، آزمون جنوب شرقی-غربی (۳۰ درجه) تقریباً شبیه به آزمون جنوب است و تنها در راستای جنوب شرقی-غربی، در فصل تابستان، شیب های نزدیک به قائم، تابش بیشتری نسبت به جنوب دریافت می کنند. میزان تابش دریافتی بر سطح پنل در راستای جنوب شرقی-غربی (آزمون ۶۰ درجه) در شیب های مختلف در ۸۷ درصد از مواقع سال بیشتر از تابش روی سطح پنل نصب شده در راستای شرق یا غرب (آزمون ۹۰ درجه) با زاویه شیب های مختلف است. با مقایسه نتایج، مشخص می شود که راستای نصب پنل فتوولتاییک هر چه از جنوب به سمت شرق یا غرب تغییر کند، شدت تابش در روزهای سال کاهش بیشتری خواهد داشت، بیشترین بازدهی تولید انرژی فتوولتاییک در شهرستان کاشان در راستای رو به جنوب، و با زاویه نصب پنل فتوولتاییک ۳۰ درجه نسبت به خط افق می باشد. همچنین مناسب ترین شیب برای نصب پنلها بین ۳۰ تا ۴۰ درجه، نسبت به سایر شیب ها به دست آمد.

کلیدواژگان: شیب، آزمون، تابش خورشیدی، کاشان.

۱. مسئول مقاله: کاشان، دانشگاه کاشان، پژوهشکده انرژی.

مقدمه

مجموع نیاز انرژی جهان در دهه هشتاد به ۷,۵ میلیارد کیلو وات و در سالهای اخیر به بیش از ۱۰ میلیارد کیلو وات در سال رسیده است که روند صد سال گذشته آن افزایشی در حدود ۲ در صد نشان می دهد. این در حالیست که تنها اگر ۰,۱ از بیابان های جهان مجهز به نیروگاه های حرارتی خورشیدی شوند همین مقدار برای تولید برق سالانه مورد تقاضای جهان کافیس (افشار، ۱۳۸۵: ۴۵). تابش خورشیدی یکی از ایمن ترین، مؤثرترین و اقتصادی ترین منابع انرژی است که پتانسیل تبدیل شدن به منبع اصلی انرژی در آینده نه چندان دور را دارد. انرژی تابش خورشیدی طی مسیر خود تا رسیدن به سطح کره زمین، تحت تاثیر شرایط جوی زمین و حرکت نسبی زمین و خورشید تغییر میکند. از این رو در هر موقعیت جغرافیایی روی کره زمین، زاویه تابش خورشیدی دریافت شده، در روزهای مختلف سال و در طول روز متفاوت است. مقدار انرژی خورشیدی رسیده به واحد سطح در واحد زمان، شدت تابش خورشیدی نامیده میشود، که در سیستم آحاد بینالمللی، واحد آن وات بر مترمربع میباشد. آگاهی از میزان شدت تابش خورشیدی در هر منطقه، به منظور بررسی میزان کارایی انواع سیستم های خورشیدی، ضروری است (سلیمان ریزی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۶). برآورد و تخمین اشتباه میزان تابش دریافتی بزرگترین ریسک در یک نیروگاه فتوولتاییک است. استفاده بهینه از انرژی خورشیدی نیازمند مکانیابی دقیق نیروگاه خورشیدی است (دینسر، ۲۰۰۰: ۱۵۷). در نبود دستگاه های اندازه گیری، اطلاعات صحیح و دقیقی از میزان انرژی خورشیدی در دسترس نیست و از طرفی میزان خطا در دستگاه های اندازه گیری، گاهی به ۳۰ درصد نیز می رسد، که مهمترین علت آن عدم کالیبراسیون دستگاه ها و وجود گردوغبار در آن ها است (سلیمان ریزی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۷)، بنابر این می توان گفت مدل های تجربی که بر پایه برآورد انرژی خورشیدی طراحی شده اند، در نبود دستگاه های اندازه گیری می تواند مفید واقع شود (معینی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲).

روابط خطی از گونه آنگستروم ضریب خاموشی و کدورت اتمسفر را در نظر نمی گیرد. لذا این رابطه مناسب ترین و عام ترین رابطه ای است که استحکام خود را برای کاربرد نقاط مختلف دنیا تاکنون حفظ کرده است. برای برآورد تابش روش های مختلفی وجود دارد، برخی بر اساس مولفه ی تابش مستقیم و پراکنده هستند. در برآورد این دو مولفه عوامل فیزیکی شامل پدیده های جوی و ضریب ابر به جهت عبور اشعه خورشید از جو به زمین و دخالت دارند. در مدل هایی دیگری بارش و رطوبت نسبی و دمای هوا در محاسبات افزوده اند. از معایب این مدل ها وابستگی ضرایب تجربی آنگستروم بر پایه پارامترهای جغرافیایی و اقلیمی است که نیاز به عوامل هواشناسی، مانند ساعات آفتابی، دما، و رطوبت دارند و اینکه در اغلب آن ها تابش کلی روزانه روی سطح افقی محاسبه می شود. همچنین برای یک شهر یا مکان خاص کاربرد دارند، زیرا وابسته به برخی عوامل هواشناسی آن مکان هستند و ضرایب مدل برای همان مکان به دست آمده است (پوردیهیمی و وفائی، ۱۳۹۴: ۲۲). تابش کل اندازه گیری شده روی سطوح افقی در بعضی از پایگاه های داده موجود است و بعضی از مکان ها مقادیر آن برآورد گردیده است. اما تابش روی سطح افقی برآوردی کلی است و بهتر است این برآورد بر روی سطوح شیب دار انجام گردد. محققان بسیاری از مدل های دیگری برای محاسبه تابش با استفاده از اطلاعات تابش خورشید روی سطوح افقی، تابش روی سطوح با شیب های مختلف نسبت به سطح افق را برآورد نموده

اند از مهمترین این مطالعات لیو جوردن^۲ (۱۹۶۱) است. تحقیق های زیادی به منظور تخمین مقدار تابش دریافتی سطح زمین انجام گردیده، بیشتر تحقیقات صورت گرفته در برآورد هایشان از متغیر های ساعت آفتابی، دمای هوا، تابش، ساعت آفتابی، میزان ابرناکی بهره گرفته اند(آنگستروم^۳، ۱۹۲۴؛ هارگرویس^۴ و همکاران، ۱۹۸۵؛ بریستو و کامپل^۵، ۱۹۸۴). باکیرسی^۶ (۲۰۰۹) هفت مدل تجربی را به منظور برآورد میانگین ماهانه تابش روزانه در ترکیه استفاده کرد. تنها پارامتر مورد استفاده در این مدلها، مدت نسبی طول روز است. ایشان نشان داد بر اساس معیارهای مختلف خطا، هر کدام از مدلها برای یک منطقه خاص در برآورد تابش خورشیدی مناسب می باشد. رحمان و مهندس^۷ (۲۰۰۸) در بررسی به تخمین مقدار R_s در ناحیه ایی از عربستان سعودی پرداخته اند آنان از ترکیبات مختلف پارامترهای رطوبت نسبی، دمای هوا و شماره روز ژولیوسی به عنوان ورودی در شبکه عصبی استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که شبکه MLP قادر است با استفاده از پارامترهای رطوبت و دما، مقدار R_s این منطقه را با دقت خوبی برآورد نماید. علیزاده و خلیلی^۸ (۲۰۰۹) در پژوهشی با استفاده از داده های اندازه گیری شده روزانه R_s در سال های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۰ معادله انگستروم- پرسکات را برای ایستگاه سینوپتیک مشهد واسنجی نمودند و همچنین یک معادله رگرسیونی منطقه ای را با در نظر گرفتن عوامل مختلف هواشناسی ارائه نمودند. سپس با استفاده از داده های سالهای ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ دو مدل ایجاد شده را اعتبارسنجی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که دو مدل دارای اختلاف معنی داری نبوده و میتوان با استفاده از ضرایب واسنجی شده معادله انگستروم- پرسکات، R_s را با دقت مناسبی تخمین زد. گیمارد^۹ (۲۰۱۱) پژوهشی جامع بر اساس هجده مدل تابش خورشیدی در سال های ۱۹۷۲ تا ۲۰۰۸ میلادی انجام داد، نتایج حاصل از مدل ها را با اطلاعات جمع آوری شده از پنج ایستگاه تشعشع سنجی با شرایط آب و هوایی متفاوت مقایسه کرده است. المورکس و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۱) هفت مدل برآورد تابش جهانی روزانه را مورد ارزیابی قرار دادند و در نهایت یک مدل جدید را برای مادرید (اسپانیا) توسعه دادند، فرجی مهباری و همکاران^{۱۱} (۱۳۹۴) به ارزیابی مدل های تجربی برآورد تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران پرداخته اند. هدف از این مطالعه ارزیابی عملکرد پنج مدل تجربی تخمین میزان تابش خورشیدی روزانه بر اساس تفاوت بین دمای حداکثر و حداقل (مدل های بریستو- کمپبل، هارگریوز، سامانی، لی و چن) است نتایج این پژوهش نشان داد این مدل ها دارای دقت بیشتری در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب است. بنابراین استفاده از این مدل ها برای تخمین تابش خورشیدی روزانه در مناطق خشک ایران که تنها داده های دمای هوا در دسترس می باشد، توصیه می

² Jordan

³ Angstrom

⁴ Hargreaves et al.,

⁵ Bristow and Campbell

⁶ Bakirci

⁷ Rehman & Mohandes

⁸ Alizad & Khalili

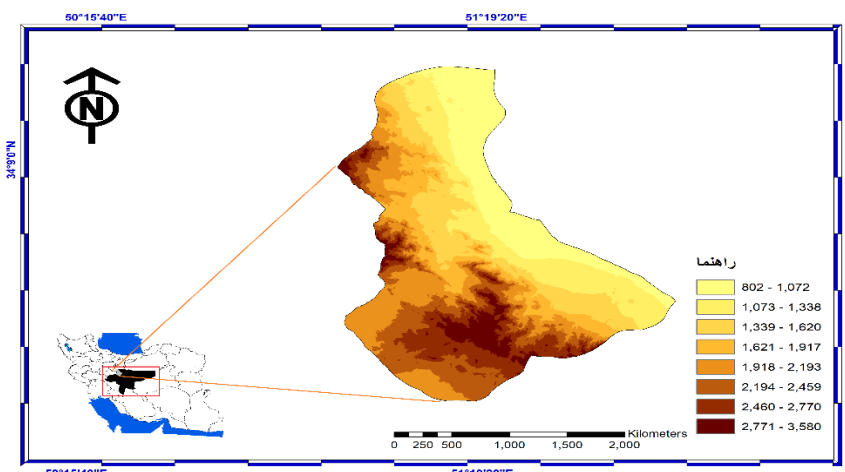
⁹ Gueymard

¹⁰ Almorox et al.,

شود. با توجه به آن که در هر ساعت از روز، میزان قابل توجهی انرژی از خورشید به زمین می رسد بنابراین لزوم استفاده از این انرژی به جای استفاده از سوخت های فسیلی ارجحیت دارد. در پژوهش حاضر میزان دریافت شدت تابش بر سطوح کلکتور در آزمون های مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا بهترین جهت برای نصب کلکتور های خورشیدی در شهرستان کاشان مشخص گردد.

منطقه مورد مطالعه

کاشان با مساحت ۲۱۰۰ هکتار در ناحیه مرکزی ایران قرار گرفته است که از یک سو پشت به کوهستان و از سوی دیگر روی به دشت کویر دارد. ارتفاع آن از سطح دریا ۹۴۵ متر بوده و دارای مختصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۵۹ دقیقه عرض شمالی می باشد. با توجه به دشتی و مسطح بودن این شهرستان مناطق مستعد نصب کلکتور های خورشیدی را داراست، بنابراین لازم است موقعیت قرارگیری و زاویه شیب کلکتورها و سطوح خورشیدی در این شهرستان بگونه ای تنظیم شود که بیشترین شار تشعشع خورشیدی در بهترین زاویه به صفحات خورشیدی برسد، نقشه موقعیت نسبی و ارتفاعی شهرستان کاشان در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) موقعیت نسبی و ارتفاعی شهرستان کاشان

روش تحقیق

امروزه با افزایش روز افزون جمعیت جهان، محدودیت منابع انرژی و اثرات سوء زیست محیطی حاصل از مصرف بی رویه سوخت های فسیلی، توجه جهانیان متوجه استفاده از انواع انرژی های تجدیدپذیر گردیده است (سعیدی، ۱۳۸۴: ۱). در فناوری سلول های خورشیدی کاهش هزینه و افزایش بازده توجه عمده محققان را به خود اختصاص داده است از کلکتور های متمرکز کننده برای دستیابی به حرارت های بالا استفاده می شود. به علت شکل هندسی خاص این کلکتور ها که معمولا سهموی انتخاب می شود تابش خورشید در کانون این کلکتور ها متمرکز می شود. این کلکتور ها حتما باید مجهز به سیستم ردیاب خورشیدی باشند. (ارباب

، ۲۰۰۹: ۱۱۶). کلکتورهای متمرکز کننده برای دستیابی به حرارت بالا در کانون باید قادر به ردیابی خورشید باشند. تابشی که به سطح کلکتور می رسد ترکیبی از تابش های مستقیم ، تابش پراکنده ، تابش انعکاسی است.

در بررسی پیشینه مدل های ارائه شده برای محاسبه تابش خورشیدی، روابط گوناگونی ارائه شده است رابطه ی خطی آنگستروم، تابش کلی روزانه روی سطح افقی را ارائه میکند. در این مدل، که براساس رابطه رگرسیون خطی ساده است میزان تابش خورشیدی دریافتی روی سطح افقی با استفاده از ساعات آفتابی محاسبه می شود، پرسکات در ۱۹۴۰ این مدل را اصلاح کرد و مدل آنگستروم پرسکات، به صورت رابطه (۱) ارائه شد.

$$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه (۱) H : تابش کلی روزانه روی سطح افقی در سطح زمین (MJ/M^2)، H_0 : تابش کلی روزانه بیرون از جو روی سطح افقی، a , b : ضرایب رگرسیون، n : حداکثر تعداد ساعات آفتابی ممکن روزانه (طول روز)، مقدار n با اندازه گیری مستقیم و مقدار N از روابط مثلثات کروی بر حسب تاریخ و عرض جغرافیایی به دست می آید. در این رابطه بلک و همکاران^{۱۱} (۱۹۵۴) با آنالیز مقدار H_0 و ساعت آفتابی n اندازه گیری شده برای ۳۲ ایستگاه هواشناسی در مناطق مختلف دنیا رابطه (۲) را برای عرض های جغرافیایی بین ۳۰ درجه جنوبی و ۶۰ درجه شمالی بدست آوردند:

$$\frac{H}{H_0} = 0.23 + 0.48\left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

سپس به این نتیجه رسیدند که ضریب b در این محدوده جغرافیایی دارای تغییرات جزئی هست. در حالی که نوسانات a نسبتا زیاد است بعد از آن در پژوهشی گلاورومک کلاک^{۱۲} (۱۹۵۸) پیشنهاد کردند که در کار های عملی برای این محدوده مقدار b برابر ۰٫۵۲ در نظر گرفته شود و ضریب a نیز برابر $\cos \Phi$ ، ۰٫۲۹ اختیار شود. به صورت رابطه (۳):

$$\frac{H}{H_0} = 0.29 \cos \Phi + 0.52\left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

آنان بیان نمودند ضریب a به ارتفاع از سطح دریا بستگی دارد به دلیل تاثیر گذاری کم آن در نظر نگرفته شده است. بنسون^{۱۳} و همکاران (۱۹۸۴) دو فصل پاییز و زمستان در یک گروه و فصول بهار و تابستان را در گروه دیگری قرار داده و روابط (۵ و ۴) را بدست آورده اند:

$$\frac{H}{H_0} = 0.18 \Phi + 0.62\left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{رابطه (۴) پاییز و زمستان}$$

^{۱۱} Black et al.,

^{۱۲} Glover J., Mc Culloch

^{۱۳} Benson et al.,

$$\frac{H}{H_0} = 0.42 + 0.35\left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{بهار و تابستان} \quad \text{رابطه (۵)}$$

با استفاده از عرض جغرافیایی، زاویه انحراف خورشید، زاویه ارتفاع خورشید، زاویه ساعتی و آزیموت می توان موقعیت خورشید را در ایام مختلف سال مشخص نمود؛ زمین در یک ۲۴ ساعت یک بار حول محور خود دوران دارد به عبارتی زمین هر ساعت یک زاویه ۱۵ درجه طول جغرافیایی را طی می نماید بنابراین از رابطه (۶) این زاویه محاسبه می گردد. (میرزا، ۱۳۸۴: ۲۰).

$$h = 15^\circ \times (12 - t) \quad \text{رابطه (۶)}$$

t: ساعت مورد محاسبه

زاویه انحراف خورشید یا مدار میل از رابطه کوپر (رابطه ۷) محاسبه می شود. زاویه ساعت برای طلوع و غروب خورشید از رابطه (۹) بدست می آید. طول روز عبارت است از: فاصله زمانی بین طلوع و غروب آفتاب. طول روز نسبت به ظهر خورشیدی قرینه است و در زمین در هر ساعت ۱۵ درجه حول محور خود حرکت می کند (حجازی و کرلایی، ۱۳۹۵: ۴۳). موقعیت خورشید در هر لحظه از روز با استفاده از زاویه ارتفاع و زاویه آزیموت تعیین می شود که زاویه ارتفاع خورشید (زاویه بین اشعه خورشید و سطح افق) و زاویه آزیموت خورشید از رابطه (۱۰ و ۱۱) به دست می آیند، جهت محاسبه زاویه آزیموت می بایست دقت گردد اگر $SIN \alpha$ کمتر از صفر باشد مقدار نادیده گرفته می شود و اگر بیشتر از صفر باشد مقدار مورد محاسبه قرار می گیرد. در بهار و تابستان مقدار زاویه خورشید بیشتر از ۹۰ درجه از سمت جنوب خواهد بود لذا می بایست شرطی مورد استفاده قرار گیرد رابطه (۱۲).

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(n - 81)\right] \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\theta \tan\delta) \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$T_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\delta \times \tan\theta) \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$SIN \alpha = (COS\theta \times COS \delta \times COS h) + (sin\theta \times sin\delta) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$sin\varphi_s = sin^{-1} \frac{cos\delta \times sin h}{cos \alpha} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در رابطه (۷) Π مجموع روز ها از اول ژانویه تا روز مورد نظر و δ مدار میل خورشید است، ω_s زاویه ساعتی خورشید $SIN \alpha$: زاویه تابش یا ارتفاع تابش، θ : عرض جغرافیایی، h : فاصله زاویه ای زمان مورد نظر نسبت به ظهر، $sin\varphi_s$: زاویه سمت خورشید

$$\text{رابطه (۱۲)} \quad \text{اگر } cos H \geq \frac{\tan\delta}{\tan L} \text{ باشد} \quad \text{بنابر این } |\varphi_s| \leq 90^\circ \text{ در غیر این صورت } |\varphi_s| \geq 90^\circ \text{ خواهد بود.}$$

تابش مستقیم خورشید روی سطح زمین (I_B) در یک محل، بخشی از اشعه تابشی می باشد که بر یک سطح عمود بر اشعه خورشید می رسد با استفاده از رابطه (۱۳) برآورد می گردد، در رابطه (۱۳) انرژی حاصل از تابش خورشید در جو (A)، از رابطه (۱۴) و عمق تابش در جو (K)، از رابطه (۱۵) محاسبه می گردد (ASHRAE). مقدار نسبت جرمی هوا (m) از رابطه (۱۶) بدست می آید (Masters, 2013).

$$I_B = Ae^{-km} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$A = 1160 + 75 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 275) \right] (W/m^2) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$k = 0.174 + 0.035 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 100) \right] \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$m = \frac{1}{\sin \alpha} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

وقتی انرژی خورشیدی به سطح پنل خورشیدی برخورد می کند، سطح پنل مقدار تابشی را جذب می کند (I_{BC}) که از طریق رابطه (۱۷) برآورد می گردد. مقدار θ در رابطه (۱۷) زاویه بین بردار عمود بر صفحه پنل فتوولتاییک و تابش مستقیم خورشید است به عبارت دیگر تابعی است از جهت پنل فتوولتاییک و زاویه ارتفاع و زاویه آزمون خورشید در هر زمان خاص که از رابطه (۱۸) برآورد می گردد (Threlkeld & Jordan, 1958).

$$I_{BC} = I_B \cos \theta \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\cos \theta = \cos \alpha \cos (\phi_s - \phi_p) \sin \Sigma + \sin \alpha \cos \Sigma \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در رابطه (۱۸) آزمون خورشید برابر ϕ_s ، آزمون پنل برابر ϕ_p زاویه بین پنل با افق یا شیب آن نسبت به افق Σ می باشد. برآورد تابش پراکنده نسبت به تابش مستقیم کمی سخت تر است، تابش ورودی بر اثر برخورد با ذرات معلق جو، آئروسول ها، بخار آب موجود در آسمان، ابر ها و... پراکنده می شود، بخشی از آن به آسمان برگشته و بخشی پراکنده شده و به زمین می رسد، تابش پراکنده از رابطه (۱۹) برآورد می گردد که عبارت است از تابش پراکنده ای از خورشید روی یک سطح افقی را نسبت به تابش مستقیم گویند. در رابطه (۱۹) ضریب پراکندگی جو (C) از رابطه (۲۰) محاسبه می گردد، با توجه به تابش پراکندگی خورشید به سطح زمین (I_{DH})، انرژی که پنل از تابش پراکندگی خورشید بدست می آورد از رابطه (۲۱) برآورد می گردد، به عبارت دیگر وقتی زاویه شیب پنل صفر باشد، تابش کل آسمان به سطح پنل بر خورد می کند، اما زمانی که کلکتور با زاویه ۹۰ درجه نسبت به سطح افق قرار بگیرد، نیمی از تابش پراکنده را دریافت می کند. انرژی که پنل از تابش انعکاسی خورشید بدست می آورد بر اساس رابطه (۲۲) محاسبه می شود، محدوده مقادیر بازتاب زمین از حدود ۰٫۸ برای برف تازه تا حدود ۰٫۱ برای یک سطح آسفالت و مقدار پیشفرض معمول برای زمین یا چمن تا حدود ۰٫۲ است (گیلبرت، ۲۰۰۴) در نهایت با مجموع تابش مستقیم و پراکنده و انعکاسی تابش کل خورشید روی سطح کلکتور از رابطه (۲۳) بدست می آید.

$$I_{DH} = CI_B \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

رابطه (۲۰)

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

رابطه (۲۱)

$$I_{DP} = I_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = I_{BC} \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right)$$

رابطه (۲۲)

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

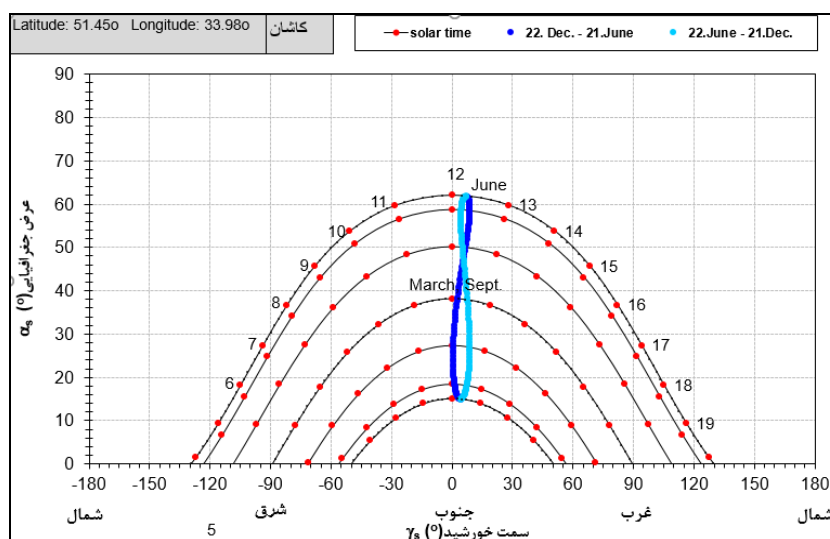
رابطه (۲۳)

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC}$$

در رابطه (۲۲) ρ ضریب انعکاسی است.

نتایج

برای اهداف کاربردی، به جای استفاده از معادلات پیچیده بهتر است مسیر خورشید بر روی صفحه افقی رسم شود، که این ترسیم، دیاگرام مسیر خورشید نامیده می شود. این نمودارها تغییرات کامل زاویه ساعتی و زاویه انحراف را برای یک سال کامل نشان می دهد. شکل (۲) نمودار مسیر حرکت خورشید شهرستان کاشان است که برای تخمین سمت خورشید و ارتفاع خورشیدی در ماه های مختلف سال از این نمودار بهره گرفته میشود. مسیر حرکت خورشید از ۲۰ دسامبر تا ۲۱ ژوئن با رنگ آبی پررنگ و از ۲۲ ژوئن تا ۲۱ دسامبر با آبی کم رنگ نمایش داده شده است.



شکل (۲) نمودار مسیر حرکت خورشید در شهرستان کاشان

در جدول (۱) نتایج پارامترهای مختلف موثر بر تابش به صورت ماهانه نشان داده شده است. برای هر روز میانگین روزهای مختلف ماه در نظر گرفته شده است، HSR بیانگر زاویه ساعت برای طلوع و غروب خورشید

است که در تابستان این زاویه به بالاترین مقدار خود می رسد، خورشید در زمستان در نیمکره جنوبی قرار دارد لذا ارتفاع خورشید در زمستان کم است وقتی خورشید در نیمکره شمالی قرار بگیرد ارتفاع خورشید افزایش یافته و تابش شدید تری نسبت به فصل زمستان خواهد داشت. مقادیر A انرژی حاصل از تابش خورشید در جو می باشد اگر دقت گردد مقادیر در فصل زمستان بیشتر بوده و نشان از آن است که خورشید با تابش به صورت مایل به دلیل قرار گرفتن در نیمکره جنوبی انرژی بیشتری را وارد جو می کند، مقدار K عمق تابش در جو را نشان می دهد که در فصل تابستان مقدار آن بیشتر از فصل زمستان می باشد.

جدول (۱) نتایج محاسبات بدست آمده از پارامتر های مختلف موثر بر تابش به صورت ماهانه در شهرستان کاشان (کیلو وات بر متر مربع)

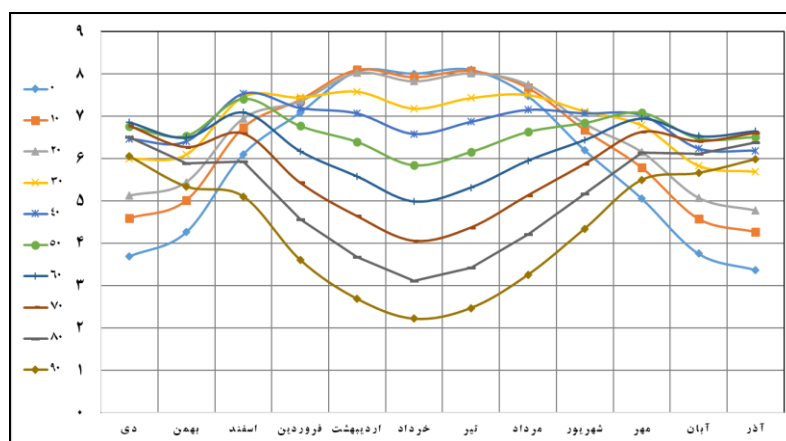
month	day	HSR	N	MEDAR MIL	$\sin \beta$	A	K
دی	16	75.11	10.01	-20.85	0.21	1019.28	0.12
بهمن	46	80.79	10.77	-13.33	0.26	905.34	0.11
اسفند	75	88.38	11.78	-2.39	0.38	976.11	0.13
فروردین	106	96.50	12.87	9.49	0.45	913.89	0.14
اردیبهشت	136	103.29	13.77	18.81	0.53	916.28	0.16
خرداد	167	106.69	14.23	23.08	0.53	870.37	0.16
تیر	197	105.09	14.01	21.10	0.54	888.33	0.17
مرداد	228	99.20	13.23	13.30	0.49	913.66	0.17
شهریور	259	91.35	12.18	1.99	0.40	910.44	0.15
مهر	289	83.25	11.10	-9.85	0.31	972.56	0.14
آبان	320	76.52	10.20	-19.05	0.22	968.14	0.12
آذر	350	73.30	9.77	-23.10	0.19	1016.78	0.12

در جدول (۲) مقادیر برآورده شده دریافت تابش کل خورشید بر سطح کلکتور در شهر کاشان نشان داده شده است، در این جدول شیب پنل از صفر تا ۹۰ درجه به صورت ۱۰ درجه ۱۰ درجه بوده، آزمون در نظر گرفته شده برای جهت جنوب می باشد به صورتی که صفحه پنل به سمت جنوب قرار گرفته است. برای محاسبه تابش مستقیم و پراکنده در نرم افزار اکسل به صورت ساعتی در ۳۶۵ روز سال محاسبه شد، مجموع سه تابش مذکور دریافت شده روی صفحه کلکتور می باشد که بر اساس واحد کیلووات ساعت بر متر مربع محاسبه شده است. شیب صفر درجه در تمامی آزمون ها یکسان بوده که بیانگر تابش مستقیم است، میزان تابش دریافتی بر سطح کلکتور در جهت جنوب در شیب های مختلف در ۶۴ درصد از مواقع سال بیشتر از تابش روی سطح کلکتور جنوب شرق یا غرب با زاویه شیب های مختلف است. در صورتی که در آزمون جنوب شرقی-غربی نسبت به جنوب ۴۴ درصد از ایام سال تابش دریافت می دارد. بیشترین میزان تابش در آزمون رو به جنوب در شیب ۳۰ و ۴۰ درجه می باشد.

جدول (۲) تابش روزانه دریافتی بر سطح کلکتور، روبه جنوب (۰ درجه) با شیب های مختلف در شهرستان کاشان (کیلو وات بر متر مربع)

شدت تابش (زیموت جنوب)	ماه	شیب (به درجه)									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
دی	3.70	3.65	3.10	3.45	3.33	3.17	3.00	2.79	2.57	2.30	
بهمن	4.26	4.22	3.64	3.97	3.82	3.61	3.41	3.15	2.90	2.59	
اسفند	6.10	6.03	5.36	5.65	5.38	5.08	4.75	4.36	3.98	3.54	
فروردین	7.08	7.15	6.82	6.82	6.53	6.19	5.77	5.33	4.86	4.34	
اردیبهشت	8.06	8.42	8.64	8.50	8.25	7.86	7.39	6.87	6.27	5.61	
خرداد	8.01	8.45	8.86	8.69	8.48	8.07	7.59	7.03	6.40	5.71	
تیر	8.10	8.53	8.92	8.74	8.52	8.12	7.63	7.09	6.46	5.77	
مرداد	7.48	7.63	7.62	7.39	7.10	6.73	6.28	5.83	5.31	4.75	
شهریور	6.20	6.13	5.60	5.71	5.42	5.10	4.73	4.34	3.94	3.49	
مهر	5.06	5.01	4.35	4.71	4.50	4.25	4.00	3.67	3.37	3.00	
آبان	3.76	3.71	3.17	3.49	3.36	3.19	3.01	2.78	2.56	2.29	
آذر	3.37	3.33	2.81	3.17	3.06	2.93	2.77	2.59	2.39	2.14	

تابش دریافتی خورشید در شیب ها و ماه های مختلف در آزمون جنوب بر روی شکل (۳) نشان داده شده است، مقادیر میانگین روزهای هر ماه می باشد، چنانچه کلکتور با شیب ۹۰ درجه به سمت جنوب قرار گیرد در فصل تابستان از اوایل اسفند تا اواخر شهریور کمترین مقدار شدت تابش را دریافت خواهد کرد. نمودار شدت تابش هر چه در ماه های مختلف به صورت یکنواخت (موازی) باشد نشان از مناسب بودن شیب مورد نظر جهت نصب کلکتور است. شیب های ۳۰ تا ۴۰ درجه در اکثر ماه ها، تابشی بالاتر از ۷ کیلووات بر مترمربع می باشد. در ماه های گرم سطوح با شیب کمتر نسبت به افق از نظر دریافت تابش خورشید وضعیت بهتری نسبت به شیب های بالاتر از آن خواهند داشت و بر عکس آن ماه های سرد سال با شیب های ۳۰ تا ۹۰ درجه تابش بیشتری دریافت خواهند نمود.



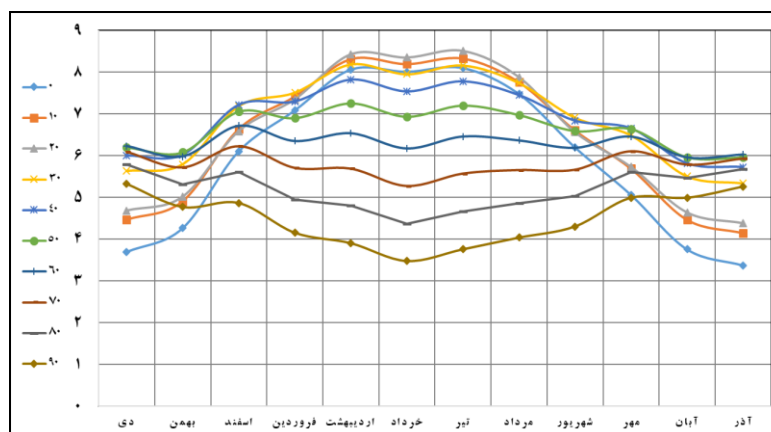
شکل (۳) شدت تابش روزانه روی سطوح رو به جنوب در شیب های مختلف در شهرستان کاشان

در جدول (۳) تابش دریافتی از خورشید بر سطح کلکتور در آزمون جنوب شرقی-غربی (آزمون ۳۰ نسبت به جنوب) نشان داده شده است. این آزمون تقریباً شبیه به جنوب بوده و تنها در جهت های جنوب شرقی-غربی در فصل تابستان شیب های نزدیک به قائم تابش بیشتری نسبت به جنوب دریافت می دارند. بالاترین مقدار تابش دریافتی بر سطح کلکتور در آزمون جنوب شرقی-غربی (۳۰) مربوط به شیب های ۳۰ و ۴۰ درجه است.

جدول (۳) تابش روزانه دریافتی بر سطح کلکتور، روبه جنوب شرقی-غربی (۳۰ درجه) با شیب های مختلف در شهرستان کاشان (کیلو وات بر متر مربع)

شدت تابش (آزمون جنوب شرقی و غربی (۳۰))	شیب (به درجه)										
	ماه	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
دی	3.70	4.47	4.68	5.64	6.00	6.20	6.23	6.09	5.79	5.33	
بهمن	4.26	4.91	5.01	5.80	6.02	6.08	5.98	5.72	5.31	4.77	
اسفند	6.10	6.64	6.59	7.19	7.22	7.06	6.72	6.23	5.61	4.87	
فروردین	7.08	7.42	7.35	7.51	7.30	6.90	6.35	5.71	4.95	4.15	
اردیبهشت	8.06	8.31	8.43	8.19	7.82	7.26	6.54	5.69	4.81	3.90	
خرداد	8.01	8.20	8.35	7.96	7.54	6.94	6.17	5.28	4.37	3.48	
تیر	8.10	8.33	8.51	8.17	7.78	7.21	6.46	5.57	4.67	3.76	
مرداد	7.48	7.76	7.88	7.75	7.45	6.98	6.37	5.66	4.86	4.04	
شهریور	6.20	6.61	6.56	6.91	6.84	6.59	6.19	5.66	5.03	4.30	
مهر	5.06	5.69	5.73	6.49	6.65	6.64	6.46	6.11	5.61	4.99	
آبان	3.76	4.46	4.64	5.51	5.81	5.97	5.96	5.79	5.46	4.99	
آذر	3.37	4.14	4.38	5.34	5.73	5.96	6.03	5.93	5.67	5.26	

در شکل (۴) تابش دریافتی بر سطح کلکتور در شیب های مختلف در آزمون ۳۰ درجه نشان داده شده، هرچه از آزمون جنوب به سمت شرق و غرب پیش روی شود، تغییرات محسوس تری در دریافت تابش بر سطح کلکتور مشاهده خواهد شد، بر اساس شکل (۴) شیب های ۴۰ تا ۹۰ درجه یکنواخت بوده و شیب های کمتر از ۴۰ درجه در فصل تابستان، بیشترین میزان دریافتی را دارند.

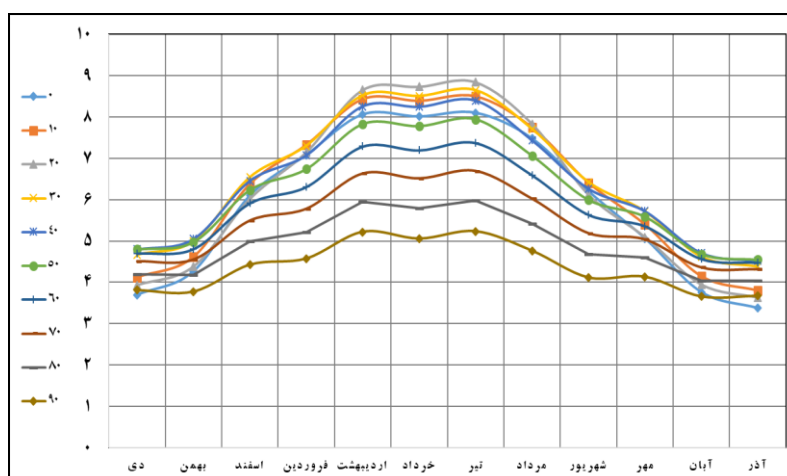


شکل (۴) شدت تابش روزانه روی سطوح رو به جنوب شرقی - غربی (۳۰ درجه) در شیب های مختلف در شهرستان کاشان

شدت تابش دریافتی در آزمون جنوب شرقی-غربی (۶۰ درجه) در شیب و ماه های مختلف در جدول (۴) نشان داده شده است، چنانچه کلکتور با شیب ۹۰ درجه به سمت جنوب شرقی-غربی (آزمون ۶۰ درجه نسبت به جنوب) قرار گیرد در فصل تابستان نسبت به فصل زمستان تابش دریافتی بیشتری خواهد داشت، میزان تابش دریافتی بر سطح کلکتور در جهت جنوب شرقی-غربی (آزمون ۶۰ درجه) در شیب های مختلف در ۸۷ درصد از مواقع سال بیشتر از تابش روی سطح کلکتور شرق یا غرب (آزمون ۹۰ درجه) با زاویه شیب های مختلف است. شکل (۵) شدت تابش در سطوح مختلف به طور روزانه ترسیم شده است و بیانگر آن است که شدت تابش در ماه های مختلف یکنواخت تر شده است.

جدول (۴) تابش روزانه دریافتی بر سطح کلکتور، روبه جنوب شرقی-غربی (۶۰ درجه) با شیب های مختلف در شهرستان کاشان (کیلو وات بر متر مربع)

شدت تابش (آزمون شرق و غرب) (۶۰)	شیب (به درجه)										
	ماه	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
دی	3.70	4.12	3.98	4.67	4.80	4.80	4.70	4.51	4.20	3.81	
بهمن	4.26	4.62	4.38	5.00	5.05	4.98	4.81	4.55	4.18	3.78	
اسفند	6.10	6.38	6.02	6.54	6.46	6.24	5.91	5.49	4.99	4.43	
فروردین	7.08	7.33	7.15	7.30	7.07	6.74	6.31	5.78	5.21	4.58	
اردیبهشت	8.06	8.43	8.66	8.52	8.26	7.88	7.29	6.63	5.95	5.22	
خرداد	8.01	8.39	8.73	8.51	8.25	7.78	7.20	6.51	5.80	5.06	
تیر	8.10	8.50	8.84	8.64	8.40	7.95	7.37	6.69	5.98	5.23	
مرداد	7.48	7.75	7.88	7.71	7.44	7.07	6.59	6.02	5.42	4.76	
شهریور	6.20	6.41	6.12	6.43	6.27	6.00	5.64	5.19	4.68	4.12	
مهر	5.06	5.40	5.09	5.71	5.72	5.59	5.36	5.04	4.60	4.14	
آبان	3.76	4.15	3.94	4.62	4.71	4.69	4.57	4.36	4.04	3.66	
آذر	3.37	3.80	3.62	4.38	4.52	4.55	4.48	4.32	4.04	3.67	

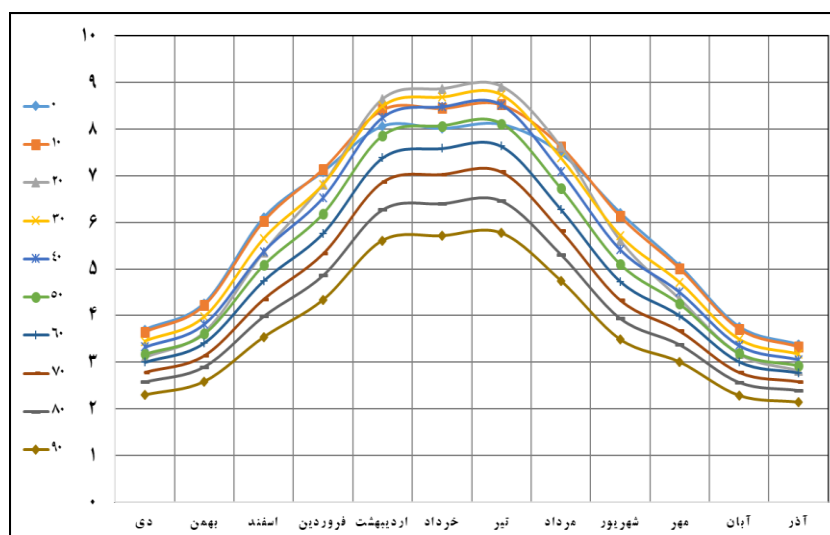


شکل (۵) شدت تابش روزانه روی سطوح رو به جنوب شرقی-غربی (۶۰ درجه) در شیب های مختلف در شهرستان کاشان

جدول (۵) تابش دریافتی روی سطوح رو به شرق یا غرب با شیب های مختلف را نشان می دهد. شدت تابش در سطوح روبه شرق و غرب با چرخشی در حدود ۹۰ درجه، ۲۳ درصد بیشتر از سطوح روبه جنوب شرق و غرب با چرخشی در حدود ۶۰ درجه است، با مقایسه جداول مشخص می گردد که هر چه از جنوب به سمت شرق یا غرب پیش روی شود شدت تابش در ایام سال کاهش بیشتری خواهد داشت. طبق شکل (۶) هر چه شیب نسبت به افق کمتر باشد تابش بیشتری را در هر ماه از سال دریافت خواهد کرد. لذا شیب ۹۰ درجه کمترین تابش و شیب ۱۰ درجه بیشترین تابش را در آزمون شرق-غرب (۹۰ درجه) دارد.

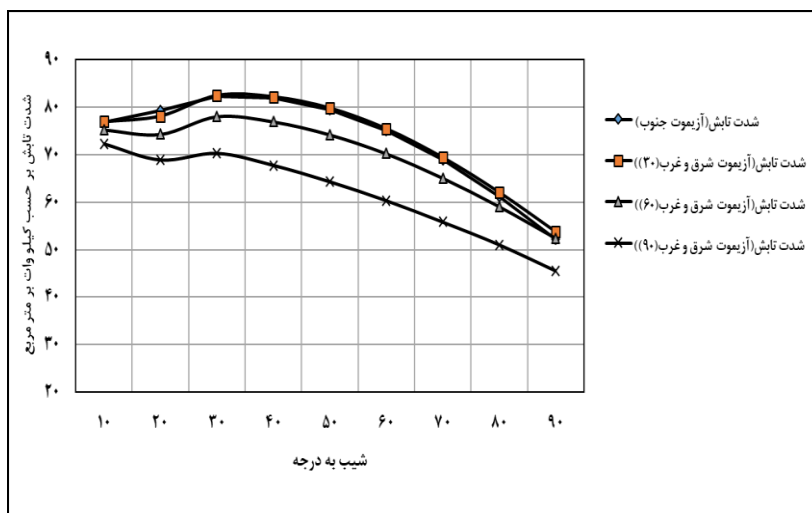
جدول (۵) تابش روزانه دریافتی بر سطح کلکتور، روبه جنوب شرق یا غرب (۹۰ درجه) با شیب های مختلف در شهرستان کاشان (کیلو وات بر متر مربع)

شدت تابش (آزمون شرق و غرب (۹۰))	شیب (به درجه)										
	ماه	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
شدت تابش (آزمون شرق و غرب (۹۰))	دی	3.70	3.65	3.10	3.45	3.33	3.17	3.00	2.79	2.57	2.30
	بهمن	4.26	4.22	3.64	3.97	3.82	3.61	3.41	3.15	2.90	2.59
	اسفند	6.10	6.03	5.36	5.65	5.38	5.08	4.75	4.36	3.98	3.54
	فروردین	7.08	7.15	6.82	6.82	6.53	6.19	5.77	5.33	4.86	4.34
	اردیبهشت	8.06	8.42	8.64	8.50	8.25	7.86	7.39	6.87	6.27	5.61
	خرداد	8.01	8.45	8.86	8.69	8.48	8.07	7.59	7.03	6.40	5.71
	تیر	8.10	8.53	8.92	8.74	8.52	8.12	7.63	7.09	6.46	5.77
	مرداد	7.48	7.63	7.62	7.39	7.10	6.73	6.28	5.83	5.31	4.75
	شهریور	6.20	6.13	5.60	5.71	5.42	5.10	4.73	4.34	3.94	3.49
	مهر	5.06	5.01	4.35	4.71	4.50	4.25	4.00	3.67	3.37	3.00
	آبان	3.76	3.71	3.17	3.49	3.36	3.19	3.01	2.78	2.56	2.29
	آذر	3.37	3.33	2.81	3.17	3.06	2.93	2.77	2.59	2.39	2.14



شکل (۶) شدت تابش روزانه روی سطوح رو به شرقی یا غربی (۹۰ درجه) در شیب های مختلف در شهرستان کاشان

مجموع تابش دریافتی روزانه در سال از خورشید بر سطح کلکتور با آزمون‌ها و زوایای شیب مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. نمودار حاکی از آن است بیشترین بازدهی تولید انرژی در شهرستان کاشان در جهت روبه جنوب تا ۳۰ درجه چرخش می باشد و همچنین مناسب ترین شیب ۳۰ تا ۴۰ درجه نسبت به سایر شیب ها خواهد بود. نامناسب ترین جهت آزمون ۹۰ درجه یعنی شرق یا غرب بودن کلکتور می باشد. لذا هرچه کلکتور ها را به سمت شرق یا غرب بچرخانیم در ماه های سرد سال شدت تابش کمتری نسبت به جهت جنوب ، دریافت خواهند نمود.



شکل (۷). مجموع تابش دریافتی روزانه در سال از خورشید بر سطح کلکتور با آزمون‌ها و زوایای شیب مختلف شهرستان کاشان (کیلو وات بر متر مربع)

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به برآورد تابش کل خورشید روی سطح کلکتور خورشیدی در شیب های مختلف و آزمون های مختلف پرداخته شده است، از مهمترین عواملی که بر کارایی کلکتور های خورشیدی و مقدار شدت تابش دریافتی آنها تاثیر دارد زاویه شیب کلکتور نسبت به افق و آزمون (نسبت به جنوب) است، در این پژوهش به پتانسیل سنجی شیب و آزمون کلکتور ها برای بیشترین بازدهی تولید انرژی پرداخته شده است، با توجه به هزینه بالای سیستم های فتوولتائیک، بهره گیری از حداکثر راندمان این منابع قدرت، یک ضرورت اساسی و غیر قابل انکار بشمار می آید، نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد، میزان تابش دریافتی بر سطح کلکتور در جهت جنوب در شیب های مختلف در ۶۴ درصد از مواقع سال بیشتر از تابش روی سطح کلکتور جنوب شرق یا غرب با زاویه شیب های مختلف است. در صورتی که در آزمون جنوب شرقی-غربی نسبت به جنوب ۴۴ درصد از ایام سال تابش دریافت می دارد. بیشترین میزان تابش در آزمون رو به جنوب در شیب ۳۰ و ۴۰ درجه می باشد، آزمون جنوب شرقی-غربی (۳۰ درجه) تقریباً شبیه به آزمون جنوب بوده و تنها در جهت های جنوب شرقی-غربی در فصل تابستان شیب های نزدیک به قائم تابش بیشتری نسبت به جنوب دریافت

می دارند. میزان تابش دریافتی بر سطح کلکتور در جهت جنوب شرقی-غربی (آزمون ۶۰ درجه) در شیب های مختلف در ۸۷ درصد از مواقع سال بیشتر از تابش روی سطح کلکتور شرق یا غرب (آزمون ۹۰ درجه) با زاویه شیب های مختلف است. شدت تابش در سطوح روبه شرق و غرب با چرخشی در حدود ۹۰ درجه، ۲۳ درصد بیشتر از سطوح روبه جنوب شرق و غرب با چرخشی در حدود ۶۰ درجه است، با مقایسه جداول مشخص می گردد که هر چه از جنوب به سمت شرق یا غرب پیش روی شود شدت تابش در ایام سال کاهش بیشتری خواهد داشت، بیشترین بازدهی تولید انرژی در شهرستان کاشان در جهت روبه جنوب تا ۳۰ درجه چرخش می باشد و همچنین مناسب ترین شیب ۳۰ تا ۴۰ درجه نسبت به سا بر شیب ها خواهد بود.

منابع

- افشار، راحله (۱۳۸۵) انرژی های تجدید پذیر، مجله زمین شناسی، ۲: ۳۵-۴۹.
- حجازی زاده، زهرا؛ کربلایی، علیرضا. (۱۳۹۵). مقدمه ای بر اقلیم آسایش حرارتی و شاخص های آن به همراه نرم افزار TCIC، انتشارات آکادمیک و انجمن جغرافیایی ایران.
- سعیدی، پونه. (۱۳۸۴). سیستم های فتوولتائیک، منبع انرژی پاک، چهارمین همایش بین المللی بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران، سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، https://www.civilica.com/Paper-CECB04-CECB04_03.html
- سلیمیان ریزی، طیبیه؛ مستاجران گورتانی، بهنام؛ کرمانی القریشی، سیدطاهر (۱۳۹۶) روش های متداول برآورد شدت تابش خورشیدی در سطح افقی زمین. فصلنامه علمی-ترویجی انرژی های تجدیدپذیر و نو، ۱: ۲۱-۱۶
- فرجی مهیاری، خدیجه؛ خانعلی، مجید؛ فرجی مهیاری، زهرا. (۱۳۹۴). ارزیابی مدل های تجربی برآورد تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران. فصلنامه انرژی ایران. ۵۶: ۳۶-۱۷.
- معینی، س؛ جوادی، م؛ کوکبی، م؛ دهقان منشادی. (۱۳۸۹). برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه، نشریه انرژی ایران، ۱۳(۲): ۴۱-۵۸.
- وفائی، راحیل؛ پوردیهیمی، شهرام. (۱۳۹۴). برآورد تابش کل خورشید روی سطح فتوولتائیکهای یکپارچه با ساختمان، ۲۵(۲): ۱۹۰-۳۶.

Almorox, J., Hontoria, C., & Benito, M. (2011). **Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain)**. *Applied Energy*, 88(5), 1703-1709.

Angstrom, A. (1924). "Solar and Terrestrial Radiation. Report to the International Commission for Solar Research on Actinometric Investigations of Solar and Atmospheric Radiation", in *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 50: 121-126

Arbab, H., Jazi, B., & Rezagholizadeh, M. (2009). **A computer tracking system of solar dish with two-axis degree freedoms based on picture processing of bar shadow**. *Renewable Energy*, 34(4), 1114-1118.

Bakirci, K. (2009). **Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey**. *Energy*, 34(4), 485-501.

- Benson, R. B., Paris, M. V., Sherry, J. E., & Justus, C. G. (1984). **Estimation of daily and monthly direct, diffuse and global solar radiation from sunshine duration measurements**. *Solar energy*, 32(4), 523-535.
- Black, J. N., Bonython, C. W., & Prescott, J. A. (1954). **Solar radiation and the duration of sunshine**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 80(344), 231-235.
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). **On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature**. *Agricultural and forest meteorology*, 31(2), 159-166.
- C.A. Gueymard, (2012). **Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models**, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 2145-2169,
- Glover, J., & McCulloch, J. S. G. (1958). **The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(360), 172-175.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). **Reference crop evapotranspiration from temperature**. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Liu, B.Y.H. and R.C. Jordan. (1961) **"Daily Insolation on Surfaces Tilted Towards Equator"**, in *rans ASHRAE*, 67: 526-541
- Masters, G. M. (2013). **Renewable and efficient electric power systems**. John Wiley & Sons.
- Myers, D. R. (2013). **Solar radiation: practical modeling for renewable**
- Threlkeld, J., & Jordan, R. (1958). **Direct radiation available on clear days**. *ASHRAE Trans.:(United States)*, 64.
- Rehman, S., & Mohandes, M. (2008). **Artificial neural network estimation of global solar radiation using air temperature and relative humidity**. *Energy Policy*, 36(2), 571-576.
- Alizade, A. and Khalili, N. 2009. **Estimation of angstrom coefficient and Developing a regression equation for solar radiation estimation (case study: Mashhad)**. *Journal of Water and Soil*, 23(1): 229-238.