



روش های متداول برآورد شدت تابش خورشیدی در سطح افقی زمین

تیبه سلیمیان ریزی^۱، بهنام مستاجران گورتانی^{۲*}، سید طاهر کرمانی القریشی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۲- استادیار، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 64611937344، b.mostajeran@ast.ui.ac.ir

چکیده

بحران انرژی در سال‌های اخیر، محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و آلاینده‌ی آن‌ها، استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی، به ویژه انرژی خورشیدی را توسعه داده است. به منظور بررسی میزان کارایی انواع سیستم‌های خورشیدی، آگاهی از میزان شدت تابش‌های خورشیدی در هر منطقه ضروری است. در تحقیق حاضر شدت تابش‌های کلی، پراکنده و مستقیم خورشید در سطح افقی زمین، در یک روز مشخص، برای شهرستان شهرکرد، با استفاده از دستگاه توان‌سنج خورشیدی اندازه‌گیری شده‌اند. همچنین داده‌های شدت تابش مستقیم خورشیدی برای این منطقه، با استفاده از مدل تابش هاتل، که توسط نرم افزار gPROMS مدل‌سازی شده، نیز محاسبه شده‌است. در نهایت به منظور کنترل نتایج تجربی به دست آمده از دستگاه توان‌سنج خورشیدی و بررسی دقت مدل هاتل، از داده‌های تابش لحظه ای ثبت شده در ایستگاه تشعشع‌سنجی اداره هواشناسی شهرستان شهرکرد استفاده شده‌است. بر اساس نتایج، داده‌های دستگاه توان‌سنج در ساعات میانی روز حداقل انحراف و در ساعات اولیه و پایانی روز حداکثر انحراف از داده‌های ثبت شده توسط پیرانومتر را داشته است. مدل تابش هاتل نیز، شدت تابش مستقیم خورشیدی را به خوبی و با انحراف نسبتاً کمی از داده‌های پیرانومتر برآورد نموده‌است.

کلیدواژگان: برآورد شدت تابش خورشیدی، توان‌سنج خورشیدی، مدل تابش هاتل، ایستگاه تشعشع‌سنجی

Conventional Methods of Defining of the Intensity of Solar Radiation on Horizontal Surface

Tayebbeh Salimiyan Rizi¹, Behnam Mostajeran Goortani^{2*}, Taher Kermani Alghorayshi³

1- Chemical Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2,3- Renewable Energies Engineering Department, University of Isfahan, Isfahan, Iran

* P.O.B. 64611937344 Isfahan, Iran, b.mostajeran@ast.ui.ac.ir

Received: 23 May 2017

Accepted: 21 August 2017

Abstract

The energy crisis, limited resources of fossil fuels, along with their negative environmental impacts in recent years have caused to increase the use of renewable energy sources, particularly solar energy. In order to evaluate the performance of solar systems, knowledge of the solar radiation intensity in each region is essential. In this study, solar irradiance components, diffuse and direct, for the city of Shahrekord, are measured. Solar power meter and Pyranometer are used for the experimental measurements. The Hattel radiation model, developed on gPROMS platform is used to calculate solar irradiance. Finally, in order to control the solar power meter results and the accuracy of Hattel model, radiation data recorded moment in Shahrekord solar radiation station has been used. The results indicate that around noon, good agreement exists between the measured results of solar power meter and those of pyranometer. While, during the early hours and the end of the day there is 23% difference between the measurement results. The Hattel model predictions for solar irradiance, agrees better with the measurements of pyranometer.

Keywords: defining of the intensity of solar radiation, solar power meter, Hattel model, solar radiation station.



۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر و کم هزینه با محاسن زیست محیطی بسیار، شناخته می‌شود. با توجه به آن که در هر ساعت از روز، میزان قابل توجهی انرژی از خورشید به زمین می‌رسد بنابراین لزوم استفاده از این انرژی به جای استفاده از سوخت‌های فسیلی ارجحیت می‌یابد. با توجه به مطالعات انجام شده در مورد میزان آفتاب‌گیر بودن، مناطق مختلف زمین به چهار دسته عالی، خوب، متوسط و ضعیف تقسیم‌بندی شده‌اند. بر این اساس بیشتر مناطق ایران جزء مناطق خوب و حتی در استان‌هایی هم چون یزد، اصفهان و فارس جزء مناطق عالی بوده‌اند [۱].

انرژی تابش خورشیدی طی مسیر خود تا رسیدن به سطح کره زمین، تحت تاثیر شرایط جوّی 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 سیستم‌های خورشیدی، ضروری است.

تابش خورشیدی ورودی به جوّ زمین، تابش فراجوی^۱ نامیده می‌شود، که پس از گذشتن از جوّ زمین به سبب پراکندگی و جذب در اتم‌ها و یون‌های گازی موجود در جو، به میزان ۲۵ تا ۳۰ درصد افت می‌کند و با نام تابش زمینی^۲ شناخته می‌شود. تابش خورشیدی که به سطح زمین برخورد می‌کند، تابش جهانی (کلی) خورشیدی^۳ نامیده می‌شود که مجموع تابش مستقیم خورشیدی^۴ و تابش پراکنده خورشیدی^۵ می‌باشد [۲].

تابش مستقیم خورشیدی، تابش رسیده به سطح افقی زمین، از جانب زاویه حجمی خورشید است و شامل بخش‌های پراکنده و یا انعکاس یافته تابش خورشید نمی‌شود. چنانچه این نوع از تابش، به سطحی عمود بر امتداد تابش برخورد کند، تابش مستقیم نرمال خورشیدی^۶ نامیده می‌شود. تابش پراکنده خورشیدی به طور کلی، مجموع تابش پراکنده آسمان^۷ و تابش پراکنده بازتابی^۸ در نظر گرفته می‌شود. تابش پراکنده آسمان، تابش‌های انعکاس یافته و پراکنده شده توسط جوّ زمین است که از تمامی نیم‌کره آسمانی به استثنای زاویه حجمی قرص خورشید، به سطح افقی زمین می‌رسد و میزان آن در روزهای آفتابی حداقل و در روزهای ابری حداکثر است. تابش پراکنده بازتابی تابشی است که پس از برخورد به سطوح مورب، به محیط اطراف بازتاب می‌شود و به ضریب بازتابش سطح و زاویه سطح با افق بستگی دارد [۲].

اندازه‌گیری تابش‌های خورشیدی به سه روش انجام می‌گیرد:

- به وسیله اطلاعات ماهواره‌ها
- به وسیله اندازه‌گیری از طریق ابزار
- به وسیله مدل‌های تابش تجربی

با اینکه اخیراً اطلاعات ارسالی از ایستگاه‌های فضایی بیشترین استفاده را به خود اختصاص داده‌اند، ولی متداول‌ترین روش برای جمع‌آوری اطلاعات شدت تابش خورشیدی روی سطح زمین، استفاده از دستگاه‌های موجود در

ایستگاه‌های تشعشع‌سنجی^۹، نظیر پیرانومتر^{۱۰} است. اگرچه در ایران اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی دارای سابقه نسبتاً طولانی است ولیکن به دلیل هزینه بالا، اکثر ایستگاه‌های هواشناسی کشور، به دستگاه‌های تشعشع‌سنج مجهز نیستند. از این رو استفاده از دستگاه‌های قابل حمل، نظیر توان‌سنج خورشیدی^{۱۱} برای سنجش شدت تابش خورشیدی، در مراکز تحقیقاتی نظیر دانشگاه‌ها متداول است. حال این سوال مطرح می‌شود که در یک روز مشخص، نتایج به‌دست‌آمده توسط وسایل قابل حمل مذکور، تا چه اندازه به نتایج واقعی به‌دست آمده توسط دستگاه‌های تشعشع‌سنج موجود در ایستگاه‌ها همخوانی دارد. پاسخ‌گویی به این سوال یکی از اهداف اصلی تحقیق حاضر است.

در نبود دستگاه‌های اندازه‌گیری، اطلاعات صحیح و دقیقی از میزان انرژی خورشیدی در دسترس نمی‌باشد، از طرفی میزان متوسط خطا در دستگاه‌های اندازه‌گیری گاه به ۳۰ درصد می‌رسد، که مهم‌ترین علت آن عدم کالیبراسیون دستگاه‌ها و وجود گرد و غبار در آن‌ها می‌باشد. پس می‌توان گفت مدل‌های تجربی که بر پایه برآورد انرژی خورشیدی طراحی شده‌اند، در نبود دستگاه‌های اندازه‌گیری می‌توانند مفید واقع شوند [۳].

پژوهشگران متعدد، با استفاده از پارامترهایی نظیر تعداد ساعات آفتابی روز، بیشترین دمای هوا، ارتفاع از سطح دریا، رطوبت نسبی، ضریب ابر و غیره، مدل‌های جدیدی برای برآورد شدت تابش خورشید ارائه داده‌اند. برخی پژوهشگران نیز با بررسی مدل‌های ارائه شده توسط سایرین، بهترین مدل را برای منطقه خود پیشنهاد داده‌اند [۴].

تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که تاثیر ساعات آفتابی روز بر مقدار تابش خورشیدی رسیده بر سطح زمین، بیش از سایر پارامترها است. براین اساس مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، مدل آنگستروم در سال ۱۹۲۴ می‌باشد. این مدل بعدها توسط پرسکات اصلاح گردید و به مدل آنگستروم-پرسکات مشهور شد. مقادیر ضرایب تجربی موجود در این مدل، بسته به شرایط جوّی و میل خورشیدی، برای هر منطقه متفاوت است و تنها در صورت استفاده از ضرایب واسنجی شده در هر منطقه، نتایج تخمین شدت تابش آن قابل قبول است [۵-۶].

پژوهشگران زیادی در سراسر دنیا به واسنجی مدل آنگستروم-پرسکات برای مناطق مختلف پرداخته‌اند. در ایران نیز پژوهشگرانی نظیر معینی [۳]، علیزاده [۵]، موسوی‌باگی [۶]، کشاورز [۷]، نادری [۸]، یزدان‌پناه [۹]، آقاشریعتمداری [۱۰] و مجنون‌هریس [۱۱] ضرایب این مدل را برای مناطق اقلیمی مختلف ایران به‌دست آورده‌اند.

در سال ۲۰۱۱ گیمارد [۱۲]، مروری جامع بر روی هجده مدل تابش خورشیدی ارائه شده بین سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۰۸ میلادی، انجام داده است و نتایج حاصل از مدل‌ها را با اطلاعات جمع‌آوری شده از پنج ایستگاه تشعشع‌سنجی با شرایط آب و هوایی متفاوت، مقایسه کرده است.

در سال ۲۰۰۶ اسکیکر [۱۳] در سوریه با استفاده از ۷ پارامتر مختلف هواشناسی و جغرافیایی، ۱۳ مدل یک تا هفت متغیری را برای محاسبه تابش خورشیدی مورد بررسی قرار داد و با وجود قابل قبول بودن همه مدل‌ها، مدل ارائه شده با هفت متغیر را بهترین مدل از نظر آماری معرفی نمود.

9. Solar Radiation Station
10. Pyranometer
11. Solar Power Meter

1. Extraterrestrial Radiation
2. Terrestrial Radiation
3. Global (Total) Solar Radiation
4. Direct Solar Radiation
5. Diffuse Solar Radiation
6. Direct Normal Solar Radiation
7. Diffuse Sky Radiation
8. Reflected Diffuse Radiation



برای اندازه‌گیری شدت تابش پراکنده آسمان، پیرانومتر دیگری همراه با یک گوی یا صفحه گرد یا حلقه سایه‌انداز به کار می‌رود، تا با سایه انداختن روی گنبد شیشه‌ای، مانع رسیدن تابش مستقیم خورشید به سطح حسگر شود. بهترین روش اندازه‌گیری تابش پراکنده آسمان استفاده از گوی سایه‌انداز می‌باشد. دستگاه‌هایی با گوی یا صفحه گرد سایه‌انداز، برای دنبال کردن حرکت ظاهری خورشید، نیازمند یک سامانه ردیاب خورشیدی هستند. از این رو استفاده از حلقه سایه‌انداز، به عنوان روشی ساده‌تر، مقرون به صرفه‌تر و با دقت پایین‌تر، در ایستگاه‌های تشعشع‌سنجی متداول است. محل قرارگیری حلقه سایه‌انداز به ارتفاع خورشید در آسمان بستگی دارد و بایستی در فصول مختلف سال با تغییر زاویه تابش و گردش خورشید در آسمان، به صورت روزانه توسط دیده‌بان ایستگاه، بازدید شود و براساس جداول ارائه شده توسط شرکت سازنده دستگاه تنظیم گردد [۱۴-۱۶].

مطابق شکل ۲، در جنوب شرقی سکوی هواشناسی ایستگاه شهرکرد، در ارتفاع ۱.۳ متری از سطح زمین، یک آلیدومتر و یک پیرانومتر همراه با حلقه سایه‌انداز، نصب شده است. شدت تابش‌های اندازه‌گیری شده توسط این دستگاه‌ها، به سه تشعشع نگار واقع در اتاق دیده‌بانی ارسال می‌گردد. اتصال تشعشع نگارها به یک رایانه و استفاده از نرم افزاری خاص، امکان ذخیره اطلاعات به دو صورت لحظه‌ای و تجمعی را، در فواصل زمانی مشخص به وجود می‌آورد. مشخصات تجهیزات به کار رفته در ایستگاه خودکار شهرکرد در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲ دستگاه‌های تشعشع‌سنج و تشعشع‌نگار موجود در ایستگاهها [۱۵]

از جمله ویژگی‌های یک مدل مناسب می‌توان به عدم پیچیدگی بیش از حد مدل، ساده بودن دستیابی به پارامترهای آن و گستردگی استفاده برای مناطق مختلف آب و هوایی اشاره کرد. لذا یکی دیگر از اهداف این تحقیق، استفاده از یک مدل تخمین شدت تابش ساده بوده، که در سال ۱۹۷۶ توسط هاتل^۱ ارائه شده است. این مدل، توسط نرم‌افزار gPROMS^۲ مدل‌سازی شده و نتایج آن برای یک روز مشخص، با داده‌های تابش به دست آمده از ایستگاه تشعشع‌سنجی و دستگاه توان‌سنج مقایسه شده است.

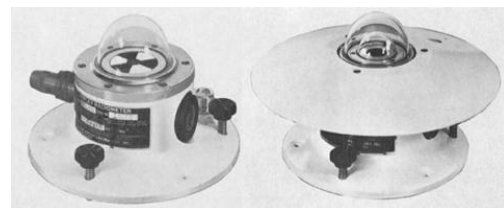
۲- معرفی دستگاه‌های اندازه‌گیری

۲-۱- دستگاه‌های موجود در ایستگاه تشعشع‌سنجی کشور

در ایستگاه‌های تشعشع‌سنجی، دو نوع وسیله برای اندازه‌گیری تابش خورشید استفاده می‌شود. دسته اول وسایلی هستند که فقط طول مدت تابش روزانه خورشید را ثبت می‌کنند و به آفتاب نگار^۳ معروفند، دسته دوم وسایلی هستند که مقدار شدت تابش خورشید را اندازه‌گیری می‌کنند و به تشعشع-سنج^۴ معروفند. یکی از دستگاه‌های تشعشع‌سنجی متداول پیرانومتر می‌باشد باشد که قادر است شدت تابش کلی، شدت تابش پراکنده آسمان و شدت تابش پراکنده بازتابی (از طرف زمین) را اندازه‌گیری کند [۱۴].

پیرانومتر در واقع یک آشکارساز گرمایی است که تمام انرژی تابشی رسیده به سطح حسگر خود را در تمامی طول موج‌ها جذب می‌کند. البته گنبد شیشه‌ای پیرانومترها مانع رسیدن امواج تابشی با طول موج بلند به حسگر می‌شود و بر این اساس دامنه طیف امواج رسیده به سطح حسگر (محدوده کاری دستگاه) را محدود می‌کند. پیرانومتر تغییرات دمایی ایجاد شده بر اثر دریافت یا از دست دادن گرما به سبب جذب یا انتشار تابش، توسط یک سطح سیاه را اندازه‌گیری می‌کند. مطابق شکل ۱، حسگر این دستگاه یک صفحه سیاه (در نمونه‌های جدید)، یا صفحات سیاه و سفید (در نمونه‌های قدیمی) است. اختلاف دمای بین صفحه جذب کننده سیاه با بدنه دستگاه (در نمونه‌های جدید) یا اختلاف دمای صفحات سیاه و سفید (در نمونه‌های قدیمی)، توسط ترموپیل^۵ به اختلاف ولتاژ تبدیل شده و توسط کابل ارتباطی به دستگاه‌های تشعشع نگار منتقل می‌شود [۱۴-۱۶].

از ترکیب دو دستگاه پیرانومتر، که یکی رو به آسمان و دیگری رو به زمین نصب شده است، دستگاهی به نام آلیدومتر^۶ تشکیل می‌شود. این پیرانومترها به ترتیب برای اندازه‌گیری شدت تابش کلی و شدت تابش بازتابی از زمین به کار می‌روند.



شکل ۱ نمونه‌ای از پیرانومترهای جدید (سمت راست) و قدیمی (سمت چپ) [۱۶]

1. Hottel
2. ارائه شده توسط شرکت Process Systems Enterprise
3. Sunshine Recorder
4. Actinometer
5. Thermopile
6. Albedometer



۲-۲- داده‌های تابش اندازه‌گیری شده به وسیله توان سنج خورشیدی

به منظور داده برداری با توان سنج خورشیدی، دستگاه روی سطح افقی تراز شده‌ای در ارتفاع ۱.۵ متری از سطح زمین، ثابت نگه داشته شده است. در این وضعیت شدت تابش اندازه‌گیری شده برابر با شدت تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین بوده است. در همان وضعیت، به منظور حذف سهم تابش مستقیم خورشیدی، یک صفحه سیاه دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر، تقریباً در فاصله ۱۲۶ میلی‌متری از حسگر دستگاه قرار داده شده است. با ایجاد سایه روی حسگر، شدت تابش اندازه‌گیری شده برابر با شدت تابش پراکنده آسمان در سطح افقی زمین بوده است.

۳-۳- داده‌های تابش به دست آمده با استفاده از مدل تابش هاتل

هاتل در سال ۱۹۷۶، مدلی جهت تخمین شدت تابش مستقیم خورشیدی، تحت شرایط آسمان صاف (بدون ابر) ارائه داده است، که تنها برای محل‌هایی با ارتفاع کمتر از ۲۵۰۰ متر از سطح دریا به کار می‌رود. این مدل علاوه بر پارامترهای مربوط به زمان و زوایای خورشیدی، تابع ارتفاع محل از سطح دریا است [۱۶-۱۷]:

$$I_b = a_0 + a_1 \exp(-k / \cos(\theta_z)) \quad (1)$$

$$I_b = I_{bn} / I_0 \quad (2)$$

a_0 ، a_1 و k ثوابت معادله هاتل هستند و θ_z زاویه سمت الرأس^۲ خورشید است است که بیانگر ارتفاع خورشید در آسمان می‌باشد. I_{bn} شدت تابش مستقیم رسیده به سطحی عمود بر امتداد پرتوی خورشید و I_0 شدت تابش فراجوی خورشید است. طبق رابطه (۳)، I_0 تنها تابعی از N شماره روز سال با شروع از اول ژانویه یا یازده دی‌ماه است:

$$I_0 = I_{sc} [1 + 0.033 \cos(360N / 365)] \quad (3)$$

ثابت خورشیدی (I_{sc})، به صورت مقدار انرژی رسیده به یک مترمربع از سطح عمود بر تابش خورشید در خارج از جو زمین در واحد زمان، تعریف می‌شود و مقدار آن برابر با ۱۳۶۷ وات بر مترمربع است.

برای محاسبه ثوابت معادله هاتل، ابتدا ضرایب تصحیح r_0 ، r_1 و r_k برای چهار ناحیه آب و هوایی مختلف، طبق جدول ۳، تعیین می‌شوند [۱۶-۱۷]:

$$r_0 = a_0 / a_0^* \quad (4)$$

$$r_1 = a_1 / a_1^* \quad (5)$$

$$r_k = k / k^* \quad (6)$$

جدول ۳ مقادیر ضرایب تصحیح r_0 ، r_1 و r_k برای ۴ ناحیه آب و هوایی [۱۶]

نوع آب و هوا	r_0	r_1	r_k
گرمسیری ^۲	0.95	0.98	1.02
تابستان منطقه عرض میانه ^۴	0.97	0.99	1.02
شمالگان ^۵	0.99	0.99	1.01
زمستان منطقه عرض میانه ^۶	1.03	1.01	1.00

2. Zenith angle
3. Tropical
4. Midlatitude summer
5. Subarctic
6. Midlatitude winter

جدول ۱ مشخصات تجهیزات تشعشع‌سنجی موجود در ایستگاه شهرکرد

مشخصه	
نام شرکت سازنده تجهیزات	شرکت هلندی KIPP & ZONEN
مدل دستگاه تشعشع‌سنج	CM 7B
مدل دستگاه تشعشع‌نگار	SOLRAD INTEGRATOR
نام نرم افزار همراه با دستگاه‌ها	Integrator
ضریب حساسیت حسگر تشعشع‌سنج	$13.55 \mu V / (W \cdot m^{-2})$

۲-۲- دستگاه قابل حمل اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی

توان سنج خورشیدی، دستگاهی قابل حمل جهت سنجش میزان تابش وارد بر واحد سطح حسگر، برحسب واحدهای W/m^2 یا $Btu/(ft^2 \cdot h)$ می‌باشد. توان سنج نشان داده شده در شکل ۳، انعطاف‌پذیری بالایی را برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی در زوایای مختلف و در نقاط خارج از دسترس فراهم می‌کند و دارای توانایی ثبت اطلاعات به صورت دستی تا ۹۹ مورد می‌باشد. برخی مشخصات این دستگاه در جدول ۲ آورده شده است.

۳- تشریح روش‌های جمع‌آوری داده

۳-۱- داده‌های تابش لحظه‌ای ثبت شده در ایستگاه تشعشع‌سنجی

ایستگاه خودکار هواشناسی شهرکرد با ارتفاع ۲۰۵۰ متر از سطح دریا، در عرض جغرافیایی ۳۲.۲۹ درجه و طول جغرافیایی ۵۰.۸۴ درجه واقع شده است. داده‌های شدت تابش کلی خورشید، شدت تابش پراکنده آسمان و شدت بازتابش زمینی برای روز دهم دسامبر سال ۲۰۱۶ میلادی، از این ایستگاه دریافت شده است. این داده‌ها از طلوع تا غروب خورشید (معادل ده ساعت آفتابی)، هر ده دقیقه یکبار برحسب وات بر مترمربع، ثبت و ذخیره شده‌اند. طبق جداول ارائه شده توسط شرکت KIPP & ZONEN، در این تاریخ، زاویه انحراف^۱ خورشید ۲۳.۰۵- درجه بوده و حلقه سایه‌انداز در فاصله ۱۲۶ میلی‌متری از گنبد شیشه‌ای پیرانومتر قرار داشته است.



شکل ۳ دستگاه توان سنج خورشیدی به کار رفته در تحقیق حاضر

جدول ۲ مشخصات دستگاه قابل حمل اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی

مشخصه	
نام شرکت سازنده دستگاه	شرکت تایوانی TES
مدل دستگاه توان سنج	TES_1333
محدوده شدت تابش اندازه‌گیری شده	0.1-2000 W/m^2
محدوده طول موج اندازه‌گیری شده	400-1000 (nm)
دقت اندازه‌گیری	$\pm 3\% \text{ rdg}$

¹ Declination angle



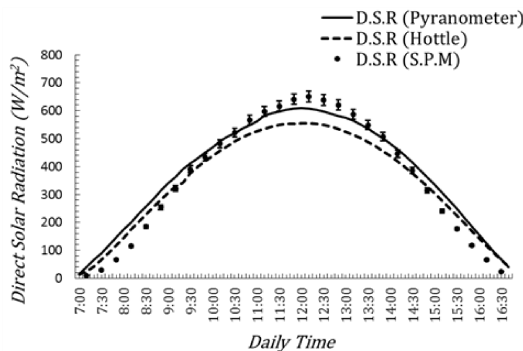
۴-۲- مقایسه مقادیر شدت تابش مستقیم خورشید در سطح افقی زمین از محاسبه اختلاف شدت تابش کلی و پراکنده آسمان در هر زمان، شدت تابش مستقیم خورشیدی به دست می‌آید. علاوه بر این شدت تابش مستقیم خورشیدی از مدل تجربی هاتل، نیز برآورد شده است. از مقایسه داده‌های به دست آمده از دستگاه توان سنج و مدل تابش هاتل، با داده‌های تابش لحظه-ای ثبت شده در ایستگاه تشعشع سنجی، نمودار شکل ۵ به دست آمده است. مشاهدات طی ۱۰ ساعت آفتابی، نشان می‌دهند که برای شدت تابش مستقیم خورشیدی در سطح افقی زمین (مشابه شدت تابش کلی)، داده‌های توان سنج، سه ساعت بعد از طلوع خورشید و سه ساعت قبل از غروب خورشید، به طور متوسط ۲۶ درصد پایین‌تر از داده‌های پیرانومتر و بین ساعات ۱۰ صبح تا ۱۴ بعدازظهر، ۱۰ درصد بالاتر از داده‌های پیرانومتر اندازه-گیری شده‌اند.

مقادیر شدت تابش مستقیم به دست آمده از مدل تابش هاتل، تقریباً در تمام ساعات آفتابی روز، پایین‌تر از داده‌های به دست آمده توسط پیرانومتر بوده‌اند. به طوری که سه ساعت بعد از طلوع خورشید و سه ساعت قبل از غروب خورشید، تطابق نسبتاً خوبی بین این مقادیر مشاهده شده و میزان انحراف نسبی بین آن‌ها، به طور متوسط ۷ درصد بوده است. این در حالی است که بین ساعات ۱۰ صبح تا ۱۴ بعدازظهر، میزان انحراف نسبی بین داده‌ها، افزایش یافته و به طور متوسط به ۹ درصد می‌رسد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

بنابر داده‌های شدت تابش کلی و مستقیم خورشیدی در سطح افقی زمین، طی یک روز مشخص (دهم دسامبر، با ده ساعت آفتابی) در شهرکرد، دستگاه توان سنج خورشیدی برای زمان‌هایی با ماکزیمم میزان تابش (۴ ساعت میانی روز)، انحراف کمتری از داده‌های ثبت شده توسط پیرانومتر داشته است. در حالی که میزان این انحراف در ساعات اولیه و پایانی روز افزایش قابل توجهی دارد. این امر می‌تواند ناشی از وجود گنبد شیشه‌ای و در نتیجه تفاوت در نحوه دریافت تابش‌ها توسط حسگر، در طول روز باشد.

مدل تابش هاتل مقادیر شدت تابش مستقیم خورشیدی در سطح افقی زمین را، همواره پایین‌تر از مقادیر ثبت شده توسط پیرانومتر برآورد می‌کند، به طوری که انحراف بین مقادیر آن‌ها، کمتر از ۹ درصد بوده است و تطابق نسبتاً خوبی با هم داشته‌اند.



شکل ۵ مقایسه مقادیر شدت تابش مستقیم خورشید در سطح افقی زمین، اندازه-گیری شده توسط دستگاه توان سنج خورشیدی و دستگاه پیرانومتر

در شرایط جوی استاندارد، با قابلیت دید تا ۲۳ کیلومتر، مقادیر a_0^* و a_1^* و k^* به صورت تابعی از A ارتفاع محل از سطح دریا و طبق روابط (۷) تا (۹) به دست می‌آیند [۱۶]:

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821 (6 - A)^2 \quad (7)$$

$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595 (6.5 - A)^2 \quad (8)$$

$$k^* = 0.2711 + 0.01858 (2.5 - A)^2 \quad (9)$$

برای هوای غبارآلود شهری، با قابلیت دید تا ۵ کیلومتر، به جای روابط (۷) تا (۹) از روابط (۱۰) تا (۱۲) استفاده می‌شود [۱۷]:

$$a_0^* = 0.2538 - 0.0063 (6 - A)^2 \quad (10)$$

$$a_1^* = 0.7678 + 0.001 (6.5 - A)^2 \quad (11)$$

$$k^* = 0.249 + 0.081 (2.5 - A)^2 \quad (12)$$

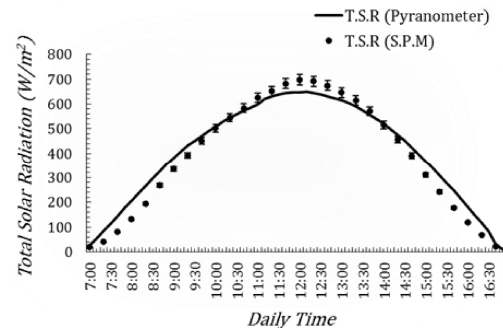
طبق جدول ۳، مقادیر ضرایب تصحیح r_0 ، r_1 و r_k برای شهرکرد در روز دهم دسامبر ($N=345$)، به ترتیب ۱.۰۳، ۱.۰۱ و ۱.۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. پس از محاسبه ثوابت معادله هاتل، I_b شدت تابش مستقیم رسیده به سطحی افقی روی زمین، از رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$I_b = T_b * I_0 * \cos(\theta_z) \quad (13)$$

۴- نتایج

۴-۱- مقایسه مقادیر شدت تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین از مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه توان سنج خورشیدی با داده‌های تابش لحظه‌ای ثبت شده در ایستگاه تشعشع سنجی، نمودار شکل ۴ به دست آمده است که مقادیر شدت تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین را طی ساعات مختلف روز نمایش می‌دهد.

طبق مشاهدات، سه ساعت بعد از طلوع خورشید (قبل از ساعت ۱۰ صبح) و سه ساعت قبل از غروب خورشید (بعد از ساعت ۱۴ بعدازظهر)، مقادیر شدت تابش کلی اندازه‌گیری شده توسط توان سنج خورشیدی پایین‌تر از مقادیر پیرانومتر بوده است. میزان انحراف نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده، در این زمان‌ها، به طور متوسط ۲۳ درصد بوده است. از طرف دیگر، دو ساعت قبل از ظهر خورشیدی تا دو ساعت بعد از ظهر خورشیدی (بین ساعات ۱۰ صبح تا ۱۴ بعدازظهر)، مقادیر شدت تابش کلی اندازه‌گیری شده توسط توان سنج خورشیدی بالاتر از مقادیر پیرانومتر بوده است. به طور متوسط، میزان انحراف نسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده، در این مدت ۱۰ درصد بوده است.



شکل ۴ مقایسه مقادیر شدت تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین، اندازه‌گیری شده توسط دستگاه توان سنج خورشیدی و دستگاه پیرانومتر



۶- فهرست علائم

شدت تابش مستقیم خورشید، که به سطحی عمود بر امتداد پرتوی خورشیدی رسیده است (Wm^{-2})	I_{bn}
شدت تابش فراجوی خورشید (Wm^{-2})	I_0
نسبت شدت تابش I_{bn} به I_0	T_b
ثابت معادله هاتل	a_0
ثابت معادله هاتل	a_1
ثابت معادله هاتل	k
زاویه سمت الراس خورشید	θ_z
ثابت خورشیدی (Wm^{-2})	I_{sc}
شماره روز سال با شروع از اول ژانویه	N
ضریب تصحیح بر اساس نواحی آب و هوایی	r_0
ضریب تصحیح بر اساس نواحی آب و هوایی	r_1
ضریب تصحیح بر اساس نواحی آب و هوایی	r_k
ارتفاع محل از سطح دریا (m)	A
تابع ارتفاع محل از سطح دریا	a^*
تابع ارتفاع محل از سطح دریا	a_1^*
تابع ارتفاع محل از سطح دریا	k^*
شدت تابش مستقیم خورشید، که به سطحی افقی روی زمین رسیده است (Wm^{-2})	I_b

۷- تقدیر و تشکر

با سپاس فراوان از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر داود محبی کلهری، عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی دانشگاه سیستان و بلوچستان و همچنین با قدردانی از زحمات پرسنل محترم اداره هواشناسی شهرستان شهرکرد، که با راهنمایی و همکاری خود ما را در ارائه این اثر یاری نموده اند.

۸- مراجع

- [1] K. E. N. Tsoukpo, K. Y. Azoumah, E. Ramde, A.K. Fiagbe, P. Neveu, X. Py, M. Gaye, A. Jourdan, Integrated design and construction of a micro-central tower power plant, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 31, pp. 1-13, 2016.
- [2] J. Radosavljević, A. Đorđević, Defining of the Intensity of Solar Radiation on Horizontal and Oblique Surfaces on Earth, *Working and Living Environmental Protection*, Vol. 2, No. 1, pp. 77-86, 2001.
- [3] س. معینی، ش. جوادی، م. کوکی، م. دهقان منشادی، برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه، نشریه انرژی ایران، دوره سیزدهم، شماره دوم، تابستان ۸۹.
- [4] ف. جعفر کاظمی، ح. مردی، بررسی داده های تابش خورشیدی در ایستگاه سینوپتیک دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، مجله مهندسی مکانیک، سال بیستم، شماره هشتم، ۱۳۹۰.

- [5] ا. علیزاده، ن. خلیلی، تعیین ضرایب معادله آنگستروم و توسعه یک معادله رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی، مجله آب و خاک، جلد بیست و سوم، شماره اول، بهار ۸۸.
- [6] م. موسوی بایگی، ب. اشرف، آ. میان آبادی، بررسی مدل های مختلف برآورد تابش خورشیدی به منظور معرفی مناسب ترین مدل در یک اقلیم نیمه خشک، مجله آب و خاک، جلد بیست و چهارم، شماره چهارم، پاییز ۸۹.
- [7] م. کشاورز، مدل سازی غیر تعادلی برج احیای آمین مجتمع گاز پارس جنوبی و امکان سنجی استفاده از انرژی حرارتی خورشیدی در آن، دانشکده علوم و فناوری های نوین دانشگاه اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۴.
- [8] م. نادى، ج. بذرافشان، ن. قهرمان، مقایسه روش های مختلف تخمین پارامترهای مدل انگستروم برای برآورد تابش روزانه خورشید بر رویه های افقی، مجموعه مقالات شفاهی چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران، اردیبهشت ماه ۱۳۸۹.
- [9] ح. یزدان پناه، رمیرمجربیان، ح. برقی، برآورد تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین در اصفهان، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال بیست و یکم، دوره سی و هفتم، شماره اول، بهار ۸۹.
- [10] ز. آقاشریعتمداری، ع. خلیلی، پ. ایران نژاد، واسنجی و بررسی رژیم سالانه ضرایب رابطه انگستروم پرسکات (a,b) در مقیاس های زمانی مختلف، مطالعه موردی ایستگاه تهران شمال (اقدسیه)، مجموعه مقالات شفاهی چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران، اردیبهشت ماه ۱۳۸۹.
- [11] ا. منجونی هریس، ش. زند پارسا، ع. سپاسخواه، م. ناظم السادات، توسعه و ارزیابی مدل های تخمین تابش خورشیدی براساس ساعات آفتابی و اطلاعات هواشناسی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال دوازدهم، شماره چهل و ششم، زمستان ۸۷.
- [12] C.A. Gueymard, 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, 2012.
- [13] K. Skeiker, Correlation of global solar radiation with common geographical and meteorological parameters for Damascus province, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, pp. 331-345, 2006.
- [14] غ. کمالی، امرادی، تابش خورشید (اصول و کاربرد ها در کشاورزی و انرژی های نو)، انتشارات پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۸۴.
- [15] اعظم باقری، جزوه آموزشی شناخت ابزار و ادوات هواشناسی، گروه پژوهشی شیمی، جؤ، اوزون و آلودگی هوای اداره کل هواشناسی استان اصفهان، ۱۳۸۷.
- [16] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Solar Energy Laboratory, Fourth Edition, New Jersey: Wiley, 2013.
- [17] H.C. Hottel, A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres, *Solar Energy*, Vol. 18, pp. 129-134, 1976.

