

پیش‌بینی مقدار کل تابش خورشیدی در کرمان با استفاده از مشخصات هندسی، نجومی، جغرافیایی و هواشناسی

محمدحسن صفاری پور (دانشجوی دکتری)

مظفرعلی مهربان (استاد)

دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان

در این پژوهش تأثیر موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی بر میانگین مقدار کل روزانه تابش خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی مربوط به مقدار کل تابش خورشیدی و همچنین مشخصات نجومی، جغرافیایی، هندسی و هواشناسی شهر کرمان که توسط سازمان هواشناسی ایران تهیه شده استفاده شد. تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی نشان داد که میانگین روزانه‌ی مقدار کل تابش خورشیدی روی یک سطح افقی با هفت عامل جغرافیایی و هواشناسی ارتباط دارد. یک رابطه‌ی رگرسیون خطی شامل هفت پارامتر برای پیش‌بینی میانگین مقدار کل تابش خورشیدی روزانه روی یک سطح افقی پیشنهاد شد. مدل پیشنهادی در این پژوهش که اعتبار آن در مقایسه با داده‌های روزانه‌ی مقدار کل تابش خورشیدی در کرمان به اثبات رسید، در مناطقی قابل استفاده است که داده‌های مقدار کل تابش خورشیدی در آنها موجود نیست ولی پارامترهای هفت‌گانه‌ی مدل را می‌توان در خارج از ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری کرد.

واژگان کلیدی: تابش کل، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، نقطه شبنم، رگرسیون خطی، ضریب همبستگی.

m.h.saffaripour@mail.uk.ac.ir
ma_mehrabian@yahoo.com

مقدمه

دارند و به شرایط محلی وابسته‌اند، یعنی استفاده از آنها در شرایطی غیر از شرایط خاص محلی توصیه نمی‌شود. عواملی که تابش خورشیدی را کنترل می‌کنند عبارت‌اند از: [۱]

۱. شرایط نجومی (ثابت خورشیدی، زاویه‌ی میل خورشیدی و زاویه‌ی ساعت)؛
۲. شرایط جغرافیایی (عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا)؛
۳. شرایط هندسی (زاویه‌ی سمت سطح، زاویه‌ی شیب سطح، ارتفاع خورشیدی و زاویه‌ی سمت خورشیدی)؛
۴. شرایط فیزیکی (پخش مولکول‌های هوا، مقدار بخار آب، پخش گرد و خاک و سایر ذرات موجود در اتمسفر از قبیل اکسیژن، نیتروژن، دی‌اکسید کربن، ازن و غیره)؛
۵. شرایط هواشناسی (اثر ابر و انعکاس محیط).

به‌منظور برآورد مقدار کل انرژی تابشی دریافتی بر یک سطح افقی مطالعات زیادی انجام شده است. نخستین رابطه‌ی تجربی توسط آنگستروم پیشنهاد شد که در آن مقدار کل تابش خورشیدی با نسبت ساعات آفتابی مرتبط است. [۱] رابطه‌ی آنگستروم توسط محققین بعدی اصلاح شد. [۲] از این روابط اصلاح شده برای برآورد مقدار کل تابش خورشیدی و در سطحی وسیع استفاده می‌شود.

طراحی و بررسی سیستم‌های انرژی خورشیدی در یک محل مستلزم آگاهی داشتن از جزئیات مربوط به انرژی دریافتی حاصل از تابش خورشید در آن محل است. اطلاعاتی از این قبیل در بسیاری از کاربردهای صنعتی، کشاورزی و زیست‌محیطی (نظیر مدل‌های رشد گیاهان، برآورد نرخ تبخیر، طراحی سیستم‌های فتولتائیک، طراحی کلکتورهای خورشیدی، خشک‌کردن محصولات کشاورزی با استفاده از نور خورشید و طراحی ساختمان‌ها) مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبیعی است که بهترین منبع چنین اطلاعاتی داده‌های اندازه‌گیری شده است. متأسفانه اندازه‌گیری مستقیم مؤلفه‌های انرژی خورشیدی مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه، به دلایل تاریخی و اقتصادی، فقط در معدودی از ایستگاه‌های هواشناسی انجام می‌شود. از این رو مدل‌های نظری برای برآورد کمیت‌های خورشیدی پیشنهاد شده است. روشی که در اغلب این مدل‌ها به‌کار رفته تعریف روابط تجربی بین مقدار کل تابش خورشیدی و کمیت‌های دیگری است که اندازه‌گیری آنها در خارج از ایستگاه‌های هواشناسی امکان‌پذیر است. این کمیت‌ها معمولاً مشخصات هواشناسی، آب‌وهوایی و جغرافیایی محل - از قبیل زمان تابش خورشید، رطوبت نسبی، درجه حرارت هوا، عرض جغرافیایی و غیره - را شامل می‌شوند. مدل‌های نظری معمولاً ماهیت نیمه‌تجربی

تاریخ: دریافت ۱۴/۱۳۸۶، دایری ۱۲/۹/۱۳۸۶، پذیرش ۲۱/۱۲/۱۳۸۶.

محققین پیرامون توزیع تابش خورشیدی در سطح جهان مطالعاتی انجام داده‌اند.^[۵] همچنین برای یافتن مدل‌هایی عمومی که در تمام جهان،^[۶] یا در نواحی بزرگی از جهان مانند اروپا^[۷] و کشورهای گرم و مرطوب^[۸] کاربرد داشته باشد تلاش‌های زیادی صورت گرفته است. علاوه بر این، رابطه‌ی آنگستروم در سطح ملی در بسیاری از کشورهای جهان از قبیل استرالیا و کانادا،^[۹-۱۱] کشورهای کارایب (شامل گواتمالا، هند غربی و ونزوئلا)^[۱۱-۱۲]، کشورهای خاورمیانه (مانند کویت، عراق، مصر و ترکیه^[۱۵-۲۰])، کشورهای آسیای جنوبی (مانند سریلانکا، هند و پاکستان^[۲۱-۲۳])، و نیجریه، سودان و لسوتو^[۲۴-۲۶] در قاره‌ی آفریقا مورد آزمایش قرار گرفته است. در آسیای جنوب شرقی کشورهای هنگ‌کنگ، ماکائو، تایلند، مالزی، سنگاپور، ویتنام و چین^[۲۷-۳۳] مطالعاتی از این دست انجام داده‌اند. محققین بسیاری زاویه‌ی میل خورشیدی و عرض جغرافیایی را مورد استفاده قرار داده‌اند.^[۳۴-۳۵] عده‌ی از آنان از ترکیب ساعات آفتابی، درجه حرارت هوا و رطوبت نسبی در مدل‌های تجربی خود استفاده کردند.^[۳۶-۳۸] برخی مقدار کل تابش خورشیدی روزانه را با ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، بیشینه‌ی درجه حرارت هوا، عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و موقعیت نسبت به آب‌های سطحی مرتبط ساختند.^[۳۹] همچنین معادلات خود را با استفاده از ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، درجه حرارت هوا، درجه حرارت خاک و شیب زاویه‌ی میل به دست آوردند.^[۴۰] عده‌ی مقدار کل تابش خورشیدی روزانه را به ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، بیشترین درجه حرارت هوا، مقدار متوسط فشار بخار روزانه و مقدار متوسط روزانه فشار در سطح دریا مرتبط ساختند.^[۴۱] یا معادلات‌شان را براساس ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، درجه حرارت متوسط هوا، درجه حرارت متوسط خاک، زاویه‌ی میل خورشیدی، ابرناکی متوسط، بارندگی متوسط و تبخیر متوسط تدوین کردند.^[۴۲]

در ایران نیز، در یکی از این مطالعات روشی برای پیش‌بینی تابش کل روزانه در تهران پیشنهاد شد که بعدها برای شهرهای بزرگ ایران تعمیم داده شد.^[۴۳] در پژوهشی دیگر مدلی برای پیش‌بینی تابش روزانه در شهرهای مختلف ایران تدوین شد.^[۴۴] در این مدل از ضریب تصحیح فاصله‌ی خورشید - زمین، ضریب ابرناکی و ساعات تابناکی خورشید به عنوان داده‌های مهم اولیه استفاده شده است. همچنین تابش ماهانه و سالانه در شهر شیراز برآورد شد.^[۴۵] از سوی دیگر دو مدل محاسباتی برای پیش‌بینی شار تابش مستقیم، پخش‌ی و کل به صورت ساعتی، روزانه و ماهانه در شهرهای تهران و اصفهان پیشنهاد شد؛^[۴۶] این مدل‌ها با استفاده از داده‌های سازمان هواشناسی کشوری تثبیت، و سپس در مورد بندرعباس تعمیم یافتند. در پژوهشی دیگر، داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی مقدار انرژی کل روزانه طی سال‌های ۱۹۸۴-۱۹۹۲ و تعداد ساعات آفتابی روزانه طی سال‌های ۱۹۸۵-۱۹۹۰ مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.^[۴۷] سپس براساس میزان تابش کل انرژی اندازه‌گیری شده‌ی روزانه در شهر کرمان دو رابطه‌ی تحلیلی کالیبره شد. روابط اصلاح شده بادقت بالا برای برآورد تابش کل انرژی خورشیدی در منطقه‌ی جنوب شرقی ایران مورد استفاده قرار گرفتند. پس از آن با به‌کارگیری ساعات تابناکی خورشید ضریب صافی ماهانه برای شهر شیراز محاسبه شد.^[۴۸] همچنین روابطی برای تخمین متوسط ماهانه‌ی ضریب صافی هوا در شهرهای مختلف ایران پیشنهاد شد.^[۴۹] و مقادیر ضریب صافی هوا برای ماه‌های مختلف (از فروردین تا اسفند) محاسبه و این مقادیر با داده‌های تجربی و مقادیر به‌دست آمده از روش‌های پیشنهادی سایر پژوهش‌گران مقایسه شدند. در تجدید نظری بر مدل‌های پیشنهادی پژوهش‌گران قبلی، شار متوسط روزانه‌ی دریافتی توسط یک صفحه‌ی افقی در بسیاری از شهرهای ناحیه‌ی مرکزی (کویر) پیش‌بینی شد.^[۵۰] در این تجدید نظر تأثیر عواملی از قبیل ارتفاع از سطح دریا، تعداد روزهای غبارآلود در ماه و تغییرات فصلی فاصله خورشید - زمین مد نظر قرار گرفته است.

اهداف این مقاله عبارت‌اند از: ۱. برقراری رابطه‌ی بین مقدار کل تابش خورشیدی و پاره‌ی از عوامل نجومی، جغرافیایی، هندسی و هواشناسی، به‌گونه‌ی که بتوان مقدار کل تابش خورشیدی بر سطح افقی در مناطقی دور از ایستگاه هواشناسی را براساس داده‌هایی که اندازه‌گیری آنها در خارج از ایستگاه هواشناسی امکان‌پذیر است به‌دست آورد (در این مدل تجربی شدت روزانه‌ی تابش خورشیدی بالای جو، نسبت ساعات آفتابی روزانه، رطوبت نسبی متوسط روزانه، متوسط روزانه‌ی بیشینه‌ی درجه حرارت هوا، متوسط روزانه‌ی بیشینه‌ی نقطه شبنم هوا، متوسط روزانه‌ی فشار اتمسفر و شیب زاویه‌ی میل خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند)؛ ۲. محاسبه‌ی ضرایب مربوط به معادلات مدل؛ ۳. محاسبه‌ی مقادیر کل تابش خورشیدی با توجه به معادلات مدل و مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده؛ ۴. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با نتایج انتشار یافته توسط سایر پژوهش‌گران؛ ۵. دسترسی به مقدار کل تابش خورشیدی در روزهای سال با توجه به داده‌های به‌کار رفته در مدل.

لازم به‌ذکر است که انرژی خورشیدی در ایران به‌وفور یافت می‌شود. انرژی تابشی ورودی به زمین در کرمان در حدود 7625 MJ/m^2 ، ساعات آفتابی ۳۱۵۷ ساعت و ساعات ابری تنها ۱۲۲۳ ساعت در سال است. انتظار می‌رود در آینده‌ی نزدیک، کاربردهای دیگر مهندسی انرژی خورشیدی نیز جایگاه واقعی‌شان را در این شهر پیدا کنند. بنابراین برقراری روابطی برای پیش‌بینی داده‌های مطلوب در زمینه‌ی مقدار کل تابش خورشیدی بر سطح افقی در مناطقی غیر از ایستگاه هواشناسی در کرمان، براساس داده‌های موجود با اندازه‌گیری‌شده الزامی به‌نظر می‌رسد.

روش استخراج داده‌ها

به‌منظور تحلیل روابط بین مقدار کل روزانه‌ی تابش خورشیدی و نیز مشخصات نجومی، جغرافیایی، هندسی و هواشناسی، اطلاعات دریافت‌شده از سازمان هواشناسی کل کشور (IMO) که در ایستگاه هواشناسی واقع در فرودگاه بین‌المللی کرمان به‌دست آمده‌اند، مورد استفاده قرار گرفته است. این فرودگاه در $35^{\circ} - 15'$ عرض شمالی و $56^{\circ} - 38'$ طول شرقی و ارتفاع $1753/8$ متر از سطح دریا قرار دارد. اطلاعات اخذشده از IMO - به‌ویژه درجه حرارت بیشینه، مقدار ساعات آفتابی و مقدار تابش کل روزانه - به‌عنوان مقادیر مرجع به‌منظور مقایسه‌ی مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل به‌کار گرفته شده‌اند. اطلاعات مربوط به هر یک از عوامل یادشده در دوره‌های طولانی به‌شرح زیر موجود بوده و در اختیار محققین قرار داده شده‌اند:

۱. درجه حرارت بیشینه، نقطه‌ی شبنم و رطوبت نسبی طی یک دوره‌ی ۴۵ ساله (۱۹۶۱ لغایت ۲۰۰۵ میلادی)؛
۲. مقدار ساعات آفتابی با استفاده از آفتاب‌نگار کمبال استوکس طی یک دوره‌ی ۴۱ ساله (۱۹۶۵ لغایت ۲۰۰۵ میلادی)؛
۳. مقدار تابش کل روزانه‌ی انرژی خورشیدی با استفاده از پیرانومتر مدل cc-۱-۶۸۱ ساخت کارخانه‌ی Kipp & Zonen هلند طی یک دوره‌ی ۲۲ ساله (۱۹۸۴ لغایت ۲۰۰۵ میلادی).

در این پژوهش یک مدل آماری برای پیش‌بینی مقدار کل تابش خورشیدی دریافتی در یک صفحه‌ی افقی پیشنهاد شده است. این یک مدل تقریبی است و پارامترهای به‌کار رفته در آن عبارت‌اند از: ۱. میانگین شدت تشعشع خورشیدی بالای جو در هر روز (H_0)؛ ۲. میانگین نسبت ساعات آفتابی در هر روز ($\frac{N}{N_0}$)؛ ۳. میانگین رطوبت نسبی روزانه (R_n)؛ ۴. میانگین بیشینه درجه حرارت هوا در هر روز (T_{max})؛ ۵. میانگین بیشینه درجه حرارت نقطه‌ی شبنم در هر روز ($T_{dp,max}$)؛ ۶. میانگین

بیشترین تعداد ساعات آفتابی مقدور از طلوع تا غروب خورشید از طریق معادله‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$N = \frac{2\omega_s}{15} \quad (5)$$

روش تقریب آماری

هدف از این پژوهش به دست آوردن روابطی آماری برای تقریب زدن تابش کل روزانه‌ی خورشید با استفاده از رگرسیون خطی چندجمله‌یی برحسب دو یا چند پارامتر از بین $H_o, \frac{P}{N}, R_h, T_{max}, T_{dp,max}, P, \sin \delta$ است. برای تحقق این هدف داده‌های تشریح شده در قسمت قبل مورد استفاده قرار گرفتند. ضمناً نتایج نهایی به صورت متوسط ماهانه ارائه می‌شوند. در رگرسیون خطی، وقتی از یک متغیر شروع کنیم به رابطه‌ی ۶ دست می‌یابیم:

$$y = a + bx \quad (6)$$

وقتی تعداد متغیرها افزایش می‌یابد، رابطه‌ی ۶ به یک رابطه‌ی خطی چندجمله‌یی تبدیل می‌شود:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7 \quad (7)$$

که در آن $a, b_1, b_2, b_3, \dots, b_7$ ضرایب رگرسیون و x_i پارامترهای مستقل مؤثر در مسئله‌اند. مقادیر اندازه‌گیری شده در هر رابطه‌ی رگرسیون از طریق ضریب همبستگی R مقایسه شدند؛ این ضریب براساس رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود: [۵۱]

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n H_{i,m} H_{i,c} - \sum_{i=1}^n H_{i,m} \sum_{i=1}^n H_{i,c}}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n H_{i,m}^2 - \left(\sum_{i=1}^n H_{i,m} \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n H_{i,c}^2 - \left(\sum_{i=1}^n H_{i,c} \right)^2 \right]}} \quad (8)$$

افزون بر این، تغییرات بین دو مقدار مقایسه‌شده به وسیله‌ی پارامترهای آماری مهم - درصد خطای نسبی، جذر میانگین مربعات تغییرات دو مقدار، و میانگین تغییرات دو مقدار - در معرض نمایش قرار گرفتند. این پارامترها معیارهای بنیادی برای دقت در سیستم‌های انرژی خورشیدی هستند.

درصد خطای نسبی (e) عبارت است از تغییر نسبی متوسط تابش کل روزانه‌ی خورشید:

$$e = \frac{H_{i,m} - H_{i,c}}{H_{i,c}} \times 100 \quad (9)$$

که در آن $H_{i,m}$ عبارت است از تأمین مقدار اندازه‌گیری شده و $H_{i,c}$ نیز تأمین مقدار پیش‌بینی شده است. درصد خطای نسبی بین $+10\%$ و -10% قابل قبول است. به علاوه از دو معیار آماری - یعنی جذر میانگین مربعات تغییرات دو مقدار (RMSE) و میانگین تغییرات دو مقدار (MBD) - و نیز از آماره‌ی t برای ارزیابی دقت روابط به دست آمده استفاده شد. جذر میانگین مربعات تغییرات دو مقدار چنین تعریف می‌شود:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,m} - H_{i,c})^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

فشار اتمسفر روزانه (P): γ . سینوس زاویه‌ی میل خورشیدی ($\sin \delta$). فرض بر این است که این پارامترها را می‌توان در خارج از ایستگاه‌های هواشناسی اندازه گرفت و مقدار کل تابش خورشیدی را به کمک مدل برآورد کرد. طبیعی است که دقت مدل به دقت اندازه‌گیری پارامترهای یادشده بستگی دارد و حتی اگر این پارامترها با خطای صفر اندازه‌گیری شوند، مدل پیشنهادی به خودی خود دارای خطا است. بنابراین منابع خطا عبارت‌اند از: خطای مدل آماری و خطای حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای مدل.

مدل پیشنهادی در این نوشتار ابزار مناسبی برای پیش‌بینی تابش کلی خورشید است مشروط بر آن که بتوان پارامترهای مؤثر در مدل را برای مناطق مختلف اندازه گرفت یا از داده‌های هواشناسی استفاده کرد. اندازه‌گیری پارامترهای مدل با استفاده از ابزارهای متداول در تمام مناطق کشور مقدور است، درحالی که اندازه‌گیری مؤلفه‌های تابش خورشیدی مستلزم دستگاه‌های تشعشع‌سنجی است که غالباً گران‌قیمت‌اند. مثلاً ایستگاه هواشناسی کرمان تا قبل از سال ۱۹۸۱ فاقد دستگاه تشعشع‌سنجی بوده، درحالی که از سال ۱۹۶۱ تا ۱۹۸۱ داده‌های هواشناسی در آرشو این ایستگاه موجود است. بنابراین پارامترهای مدل را می‌توان با وسایل اندازه‌گیری استاندارد که چندان گران‌قیمت نیستند در هر شهر دورافتاده‌ی اندازه‌گیری کرد و مؤلفه‌های تابش خورشیدی را به کمک مدل به دست آورد. بدیهی است روش‌های استاندارد برای اندازه‌گیری پارامترهای یادشده همراه با فرضیات لازم و خطاهای حاصل توسط سازمان هواشناسی جهانی تعریف شده است. [۵۱]

انتخاب پارامترهای مدل

انتخاب پارامترهای مدل برای پیش‌بینی شدت کل تابش خورشیدی کار مهمی است که مستلزم تجربه فراوان و اطلاع کافی از نحوه‌ی تأثیر این پارامترها بر شدت کل تابش خورشیدی است. پارامترهای به کار رفته برای این منظور بر مبنای سادگی اندازه‌گیری آنها در خارج از ایستگاه‌های هواشناسی و بدون نیاز به تجهیزات گران‌قیمت انتخاب شده‌اند. ذیلاً توضیح مختصری در مورد این پارامترها ارائه می‌شود.

شدت تابش خورشیدی بالای جو بر یک سطح افقی از معادله‌ی ۱ به دست می‌آید: [۱۸]

$$H_o = \frac{24G_o}{\pi} (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta) \quad (1)$$

که در آن G_o ثابت خورشیدی بالای جو (معادل $1367W/m^2$)؛ φ عرض جغرافیایی محل؛ δ زاویه‌ی میل خورشیدی؛ و ω_s زاویه‌ی ساعت طلوع خورشیدی است. ضریب تصحیح خارج از مرکز مدار زمین چنین تعریف می‌شود:

$$G_{o,n} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n^*}{365} \right) \quad (2)$$

که در آن n^* شماره‌ی روز سال از اول ژانویه است. زاویه‌ی ساعت طلوع (یا غروب) خورشید مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\omega_s = \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta) \quad (3)$$

زاویه‌ی میل خورشیدی نیز مطابق معادله‌ی ۴ قابل محاسبه است:

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n^*}{365} \right) \quad (4)$$

مورد استفاده قرار گرفت و روابطی با بیشترین ضرایب همبستگی (R) انتخاب شدند. چنانچه از یک متغیر استفاده شود، بیشترین ضرایب همبستگی مربوط به روابطی شامل H یا $\sin \delta$ خواهد بود:

$$H = 580276 + 547502 \sin \delta \quad (R = 0.95943) \quad (13)$$

$$H = -459706 + 0.718H_s \quad (R = 0.955) \quad (14)$$

در بین معادلاتی که شامل دو متغیرند، بیشترین ضرایب همبستگی مربوط به روابطی است که در برگیرنده $\sin \delta$ یا $\frac{n}{N}$ یا R_h باشد:

$$H = 3455 + 5180.1 \sin \delta + 3270.6 \frac{n}{N} \quad (R = 0.97687) \quad (15)$$

$$H = 7269.4 + 3894 \sin \delta - 44817R_h \quad (R = 0.97898) \quad (16)$$

چنانچه از سه متغیر استفاده کنیم بیشترین ضرایب همبستگی مربوط به روابطی است که شامل $\sin \delta$ ، R_h ، $T_{dp,max}$ یا $\frac{n}{N}$ باشد:

$$H = 608370 + 422675 \sin \delta - 32593R_h + 109475 \frac{n}{N} \quad (R = 0.97947) \quad (17)$$

$$H = 721175 + 408070 \sin \delta - 45538R_h - 25851T_{dp,max} \quad (R = 0.97914) \quad (18)$$

همچنین برای روابطی با چهار متغیر، بیشترین مقدار R مربوط به استفاده از روابطی برحسب متغیرهای $\sin \delta$ ، $\frac{n}{N}$ ، R_h ، $T_{dp,max}$ یا $\sin \delta$ ، $\frac{n}{N}$ ، R_h ، $T_{dp,max}$ است:

$$H = 589676 + 4493 \sin \delta + 1200.10 \frac{n}{N} - 32318R_h - 327452T_{dp,max} \quad (R = 0.97972) \quad (19)$$

$$H = 680376 + 447775 \sin \delta + 130374 \frac{n}{N} - 42219R_h - 237616T_{dp,max} \quad (R = 0.97966) \quad (20)$$

به منظور برآورد مقدار تابش کل روزانه با استفاده از پنج متغیر، بیشترین مقدار R به دست آمده مربوط به روابطی برحسب متغیرهای $\sin \delta$ ، $\frac{n}{N}$ ، R_h ، $T_{dp,max}$ ، P و یا $\sin \delta$ ، $\frac{n}{N}$ ، R_h ، $T_{dp,max}$ ، H_s است:

$$H = -676379 + 465679 \sin \delta + 1234 \frac{n}{N} - 30994R_h - 307277T_{dp,max} + 15713P \quad (R = 0.97981) \quad (21)$$

$$H = 6169710 + 39713 \sin \delta + 128975 \frac{n}{N} - 31238R_h - 317666T_{dp,max} + 0.7222H_s \quad (R = 0.97976) \quad (22)$$

برای رسیدن به بیشترین مقدار R در هنگام استفاده از شش متغیر، پارامترهای $\sin \delta$ ، $\frac{n}{N}$ ، R_h ، $T_{dp,max}$ ، P ، H_s یا $\sin \delta$ ، $\frac{n}{N}$ ، R_h ، $T_{dp,max}$ ، P ، T_{max} مورد استفاده قرار گرفت.

$$H = -68347 + 4656710 \sin \delta + 1231710 \frac{n}{N} - 30777R_h - 31226T_{dp,max} + 157198P + 0.52672T_{max} \quad (R = 0.97981) \quad (23)$$

$$H = -591671 + 427075 \sin \delta + 129375 \frac{n}{N} - 307373R_h - 307428T_{dp,max} + 1375080P + 0.501049H_s \quad (R = 0.97983) \quad (24)$$

که در آن n تعداد زوج داده‌ها است. جذر میانگین مربعات تغییرات دو مقدار (RMSE) اطلاعاتی در مورد عملکرد کوتاه مدت روابط ارائه می‌دهد و برای این منظور انحراف واقعی بین مقدار محاسبه شده و مقدار اندازه‌گیری شده را جمله به جمله مقایسه می‌کند. هرچه انحراف بین مقدار محاسبه شده و مقدار اندازه‌گیری شده کمتر باشد، مدل عملکرد بهتری خواهد داشت. چند انحراف بزرگ در سری ممکن است به افزایش RMSE منجر شود.

میانگین تغییرات دو مقدار (MBD) نیز مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:

$$MBD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,m} - H_{i,c}) \quad (11)$$

و اطلاعاتی در مورد عملکرد بلندمدت روابط ارائه می‌دهد. هرچه MBD کمتر باشد مطلوب تر است. مثبت بودن مقدار MBD حاکی از آن است که مقادیر محاسبه شده با تقریب نقصانی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده به دست می‌آیند؛ منفی بودن MBD مقادیر محاسبه شده را با تقریب اضافی نشان می‌دهد. مفهوم این معیار آن است که تقریب اضافی در یک اندازه‌گیری اثر تقریب نقصانی در اندازه‌گیری دیگر را خنثی می‌کند. هیچ یک از معیارهای یاد شده به تنهایی نشانه‌ی عملکرد مدل نیست. ممکن است در یک سری آزمایش RMSE بزرگ و در عین حال MBD کوچک (پراکندگی زیاد در اطراف خط تقریب دقیق) داشته باشیم. از سوی دیگر ممکن است RMSE کوچک در کنار MBD بزرگ (تقریب اضافی یا نقصانی مکرر) ظاهر شود.

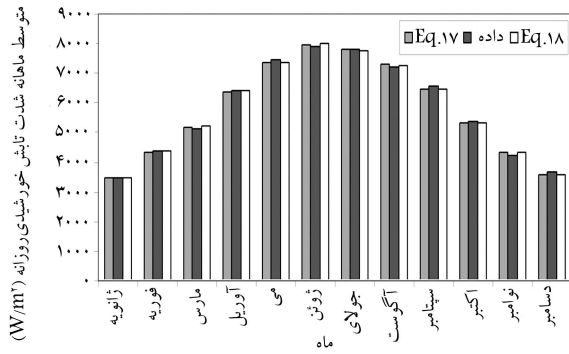
اگرچه شاخص‌های آماری یاد شده روش معقولی برای مقایسه‌ی مدل‌ها ارائه می‌دهند، نمی‌توان ادعا کرد که پیش‌بینی‌های حاصل از مدل اختلاف معنی‌دار و قابل ملاحظه‌ی با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی متناظر خود ندارند. برای بررسی این ادعا آزمون t به کار گرفته شده است. آماره‌ی t به شاخص‌های قبلی (یعنی به RMSE و MBD) بستگی دارد و برای تعیین خواص آماری، مؤثرتر از هر دو شاخص یاد شده است. این آزمون آماری مقایسه‌ی مدل‌های موجود را ممکن می‌سازد و در عین حال نشان می‌دهد که آیا پیش‌بینی‌های یک مدل در درجه‌ی خاصی از اعتبار دارای اهمیت آماری هستند یا خیر. آماره‌ی آزمون t مطابق رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود:

$$t = \left[\frac{(n-1)MBD^2}{RMSE^2 - MBD^2} \right]^{1/2} \quad (12)$$

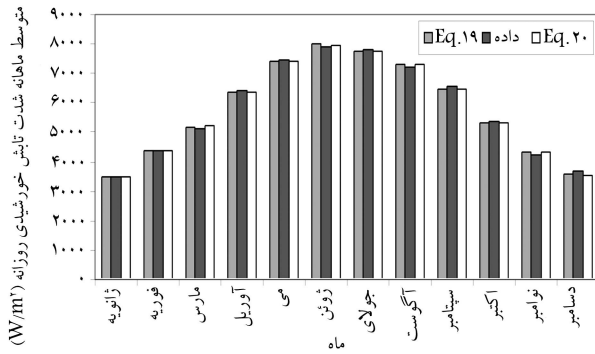
هرچه مقدار t کوچک‌تر باشد عملکرد مدل بهتر است. برای این که از اهمیت آماری پیش‌بینی‌های یک مدل مطمئن شویم، باید مقدار t بحرانی را از جداول استاندارد آماری تعیین کنیم. t بحرانی عبارت است از t در درجه‌ی اعتبار α و درجه‌ی آزادی n-1. برای این که پیش‌بینی‌های حاصل از مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی متناظر در درجه اعتبار $1-\alpha$ از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشته باشند، مقدار محاسبه شده‌ی t باید کمتر از مقدار بحرانی آن باشد.

نتایج

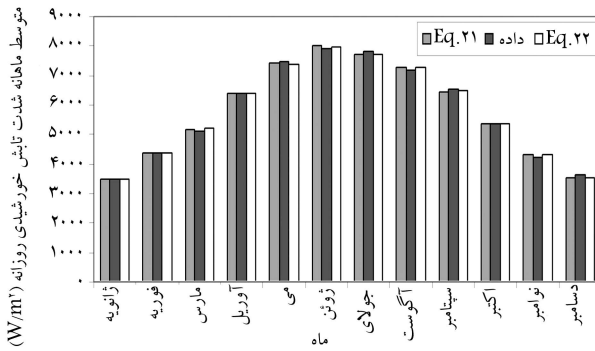
با تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی چندجمله‌ی در مورد پارامترهای هفت‌گانه $(H_s, \sin \delta, \frac{n}{N}, R_h, T_{max}, T_{dp,max}, P)$ با ترکیب‌های مختلف به صداهای رابطه‌ی گوناگون برای برآورد تابش کل خورشید دست یافتیم. آن دسته از روابطی که با استفاده از یک برنامه‌ی رایانه‌ی پیشرفته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند به روابطی منجر شدند که مطابق معادله‌ی ۷ برحسب ضرایب رگرسیون، $b_7, b_6, b_5, b_4, b_3, b_2, b_1$ و b_0 بیان می‌شوند. برای یافتن ثابت‌های یاد شده تجزیه و تحلیل رگرسیون حداقل مربعات



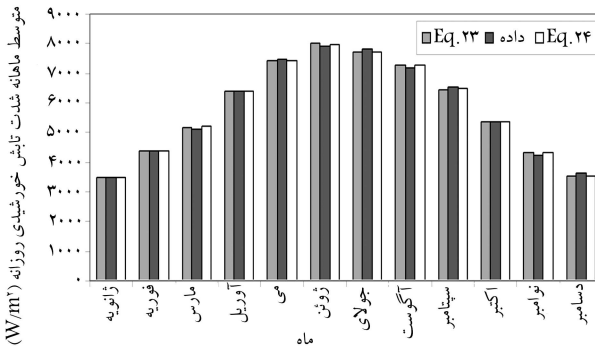
شکل ۳. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روابط سه متغیره شامل $\sin \delta, R_h, T_{dp,max}$ یا $\sin \delta, R_h, \frac{n}{N}$.



شکل ۴. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روابط چهار متغیره شامل $\sin \delta, \frac{n}{N}, R_h, T_{dp,max}$ یا $\sin \delta, \frac{n}{N}, R_h, T_{dp,max}$.



شکل ۵. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روابط پنج متغیره شامل $\sin \delta, \frac{n}{N}, R_h, T_{dp,max}, H$ یا $\sin \delta, \frac{n}{N}, R_h, T_{dp,max}, P$.



شکل ۶. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روابط شش متغیره شامل $\sin \delta, \frac{n}{N}, R_h, T_{dp,max}, P, H$ یا $\sin \delta, \frac{n}{N}, R_h, T_{dp,max}, P, T_{max}$.

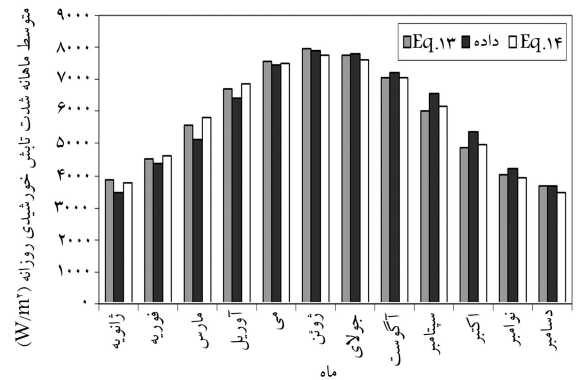
همچنین به منظور برآورد مقدار کل تابش روزانه در شهر کرمان با استفاده از هفت متغیر $(H_0, \sin \delta, \frac{n}{N}, R_h, T_{max}, T_{dp,max}, P)$ رابطه‌ی ۲۵ به دست آمد که دارای بیشترین مقدار R است:

$$H = -6912.3 + 4104.9 \sin \delta + 0.071014 H_0 + 1262.9 \frac{n}{N} - 25.923 R_h + 9.8763 T_{max} - 39.67 T_{dp,max} + 14.033 P$$

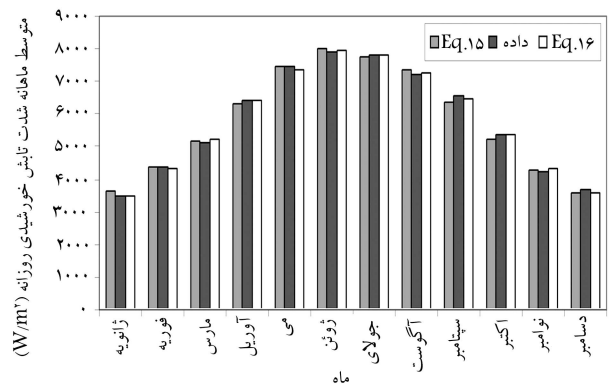
$$(R = 0.97984) \quad (25)$$

بحث

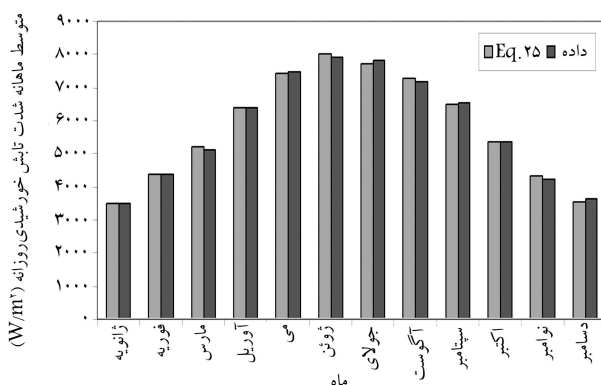
رابطه‌ی هفت متغیره بیشترین مقدار R را در بین صدها رابطه‌ی رگرسیون دارد. مقادیر شدت متوسط تابش کل روزانه‌ی خورشید با استفاده از روابطی که در قسمت‌های قبلی به دست آمد با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی نظیر خود مقایسه شدند. نتایج حاصله در شکل‌های ۱ تا ۷ نشان داده شده‌اند. روابطی که با تعداد متغیره‌های یکسان به دست آمده‌اند نیز در همین شکل‌ها مقایسه شده‌اند. هرچند داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای تمام روزهای سال موجود است، برای سهولت متوسط ماهانه‌ی داده‌های مربوط به روزهای هر ماه را در شکل‌های یادشده مورد استفاده قرار داده‌ایم.



شکل ۱. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روابط یک متغیره شامل $\sin \delta$ یا H_0 .



شکل ۲. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روابط دو متغیره شامل $\sin \delta, R_h$ یا $\sin \delta, \frac{n}{N}$.



شکل ۷. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از روابط هفت متغیره $(H_o, \sin \delta, \frac{N}{N}, R_h, T_{max}, T_{dp,max}, P)$.

درصد خطای نسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به شدت متوسط ماهانه تابش کل خورشیدی برای دوازده ماه سال محاسبه شده‌اند و نتایج حاصله در جداول ۱ تا ۴ درج شده‌اند. واضح است که عملکرد روابط به دست آمده یکسان نیست، و بنابراین شاخص‌های MBD و RMSE مربوط به روابط به دست آمده محاسبه شدند. مقادیر مربوط به MBD و RMSE به‌طور جداگانه قابل اطمینان نیستند و ممکن است به تصمیم نادرستی در انتخاب بهترین

رابطه‌ی منتج از روابط به دست آمده منجر شود؛ ضمناً MBD و RMSE هیچ‌کدام به‌تنهایی برای نشان دادن عملکرد یک رابطه کافی نیستند. بنابراین از آماره‌ی t همراه با شاخص‌های یاد شده برای ارزیابی بهتر دقت داده‌های پیش‌بینی شده استفاده شد؛ زیرا آماره‌ی t به شاخص‌های MBD و RMSE بستگی دارد و برای تعیین خواص آماری مؤثر است. آزمون‌های MBD، RMSE و t در جداول ۱ تا ۴ داده شده‌اند. در مواردی که مقادیر t از مقادیر t بحرانی بیشتر است روابط مورد استفاده فاقد اهمیت آماری‌اند. براساس جداول ۱ تا ۴، معادله‌ی ۲۵ بهترین نتایج را در بین کلیه‌ی روابط به دست آمده ارائه می‌دهد و مقادیر e در محدوده‌ی خطای ۳۹٪- تا ۲۳٪ قرار دارند. این خطا از نقطه‌نظر محاسبات مهندسی قابل قبول است. مقادیر MBD، RMSE و آماره‌ی t به ترتیب عبارت‌اند از: $-0.331 W/m^2$ ، $70 W/m^2$ و 0.016 . از آنجا که این رابطه منجر به کمترین شاخص‌های آماری می‌شود، به‌عنوان بهترین رابطه برای برآورد شدت تابش کل روزانه در کرمان انتخاب شد. خطای مربوط به مدل هفت‌متغیره از مدل‌های دیگر کم‌تر است. نتیجه‌ی تجزیه و تحلیل پراکنندگی داده‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. در این شکل‌ها نمودار پراکنش مقادیر مدل و اندازه‌گیری شده به ترتیب برای ۳۶۵ روز و ۱۲ ماه رسم شده‌اند.

به پیشنهاد درج شده در برخی منابع روزهای خاصی از هر ماه را انتخاب^[۵۳] و شدت کل تابش خورشید را در این روزها مقایسه کرده‌ایم (جدول ۵). چنان که مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده از مطابقت خوبی برخوردارند.

جدول ۱. مقادیر e ، MBD، RMSE، آماره‌ی t و t بحرانی مربوط به معادلات ۱۳ تا ۱۶ مختص کرمان.

ماه	$\bar{H}_{i,m}$	Eq.(۱۳)		Eq.(۱۴)		Eq.(۱۵)		Eq.(۱۶)	
		$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$	$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$	$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$	$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$
ژانویه	۳۴۷۸	۳۸۵۵	-۱۰٫۸۴	۳۷۵۸	-۸٫۰۵	۳۶۲۶	-۴٫۲۶	۳۴۷۹	-۰٫۰۳
فوریه	۴۳۹۷	۴۵۴۲	-۳٫۳۰	۴۶۴۶	-۵٫۶۵	۴۳۸۸	۰٫۲۱	۴۳۴۲	۱٫۲۶
مارس	۵۱۰۷	۵۵۷۵	-۹٫۱۶	۵۸۱۰	-۱۳٫۷۷	۵۱۶۳	-۱٫۱۰	۵۲۲۲	-۲٫۲۵
آوریل	۶۳۹۰	۶۷۰۴	-۴٫۹۲	۶۸۶۷	-۷٫۴۶	۶۳۲۴	۱٫۰۳	۶۴۰۲	-۰٫۱۹
می	۷۴۵۳	۷۵۶۶	-۱٫۵۲	۷۵۱۳	-۰٫۸۰	۷۴۴۵	۰٫۱۱	۷۳۵۸	۱٫۲۸
ژوئن	۷۹۲۷	۷۹۴۹	-۰٫۲۸	۷۷۴۰	۲٫۳۵	۷۹۸۷	-۰٫۷۷	۷۹۶۱	-۰٫۴۴
ژولای	۷۸۰۷	۷۷۷۳	۰٫۴۳	۷۶۰۴	۲٫۵۹	۷۷۷۶	۰٫۳۹	۷۸۰۳	۰٫۰۴
اگوست	۷۱۹۵	۷۰۶۰	۱٫۸۸	۷۰۷۹	۱٫۶۲	۷۳۷۵	-۲٫۴۹	۷۲۷۵	-۱٫۱۱
سپتامبر	۶۵۵۱	۵۹۹۳	۸٫۵۲	۶۱۵۲	۶٫۰۸	۶۳۶۱	۲٫۹۱	۶۴۷۳	۱٫۱۹
اکتبر	۵۳۶۶	۴۸۶۸	۹٫۲۹	۴۹۷۷	۷٫۲۶	۵۲۳۵	۲٫۴۴	۵۳۴۷	۰٫۳۵
نوامبر	۴۲۲۳	۴۰۱۷	۴٫۸۸	۳۹۴۷	۶٫۵۳	۴۲۸۳	-۱٫۴۳	۴۳۲۴	-۲٫۴۰
دسامبر	۳۶۶۳	۳۶۵۵	۰٫۲۲	۳۴۷۵	۵٫۱۴	۳۵۸۸	۲٫۰۵	۳۵۶۷	۲٫۶۳
MBD		-۰٫۰۱۸		-۰٫۹۷۲۲		۰٫۴۳۶۷		۰٫۲۵۷	
RMSE		۳۰۵		۳۳۹		۱۰۴		۷۰	
t		۰٫۰۰۰۰۲		۰٫۰۰۰۹۵		۰٫۰۱۴		۰٫۰۱۲۲	
t -critical ($\alpha/2 = 0.025, 11$)		۲٫۲۰۱۰		۲٫۲۰۱۰		۲٫۲۰۱۰		۲٫۲۰۱۰	

جدول ۲. مقادیر e, MBD, RMSE, آماره‌ی t و t بحرانی مربوط به معادلات ۱۷ تا ۲۰ مختص کرمان.

ماه	$\bar{H}_{i,m}$	Eq.(۱۷)		Eq.(۱۸)		Eq.(۱۹)		Eq.(۲۰)	
		$\bar{H}_{i,c}$	e(%)	$\bar{H}_{i,c}$	e(%)	$\bar{H}_{i,c}$	e(%)	$\bar{H}_{i,c}$	e(%)
ژانویه	۳۴۷۸	۳۵۰۵	-۰٫۷۸	۳۴۷۱	۰٫۲۱	۳۴۹۷	-۰٫۵۵	۳۴۸۲	-۰٫۱۳
فوریه	۴۳۹۷	۴۳۴۵	۱٫۱۹	۴۳۷۴	۰٫۵۲	۴۳۸۶	۰٫۲۵	۴۳۸۹	۰٫۱۸
مارس	۵۱۰۷	۵۱۸۰	-۱٫۴۳	۵۲۲۸	-۲٫۳۷	۵۱۸۴	-۱٫۵۱	۵۲۰۰	-۱٫۸۲
آوریل	۶۳۹۰	۶۳۵۷	۰٫۵۱	۶۴۰۵	-۰٫۲۴	۶۳۵۷	۰٫۵۲	۶۳۷۱	۰٫۳۰
می	۷۴۵۳	۷۳۷۴	۱٫۰۶	۷۳۷۰	۱٫۱۱	۷۳۹۱	۰٫۸۲	۷۳۸۹	۰٫۸۵
ژوئن	۷۹۲۷	۷۹۷۱	-۰٫۵۶	۷۹۹۲	-۰٫۸۲	۸۰۱۰	-۱٫۰۵	۷۹۷۸	-۰٫۶۵
جولای	۷۸۰۷	۷۷۹۶	۰٫۱۴	۷۷۷۴	۰٫۴۲	۷۷۵۸	۰٫۶۲	۷۷۶۸	۰٫۴۹
آگوست	۷۱۹۵	۷۳۲۲	-۱٫۷۶	۷۲۴۹	-۰٫۷۴	۷۲۹۳	-۱٫۳۶	۷۳۰۳	-۱٫۵۰
سپتامبر	۶۵۵۱	۶۴۶۵	۱٫۳۱	۶۴۷۶	۱٫۱۵	۶۴۶۸	۱٫۲۷	۶۴۵۹	۱٫۴۱
اکتبر	۵۳۶۶	۵۳۳۹	۰٫۵۰	۵۳۴۱	۰٫۴۷	۵۳۳۰	۰٫۶۶	۵۳۳۹	۰٫۵۰
نوامبر	۴۲۲۳	۴۳۲۹	-۲٫۵۲	۴۳۱۹	-۲٫۲۷	۴۳۲۳	-۲٫۳۸	۴۳۳۵	-۲٫۶۶
دسامبر	۳۶۶۳	۳۵۶۸	۲٫۵۸	۳۵۵۹	۲٫۸۴	۳۵۵۹	۲٫۸۵	۳۵۴۳	۲٫۲۹
MBD		۰٫۳۳۴۲		-۰٫۰۸۸۴		-۰٫۰۹۲۱		-۰٫۰۷۷۵	
RMSE		۷۲		۶۹		۷۰		۷۴	
t		۰٫۳۳۴۲		۰٫۰۰۴۳		۰٫۰۰۴۳		۰٫۰۰۳۵	
t-critical ($\alpha/2 = ۰٫۰۲۵, ۱۱$)		۲٫۲۰۱۰		۲٫۲۰۱۰		۲٫۲۰۱۰		۲٫۲۰۱۰	

جدول ۳. مقادیر e, MBD, RMSE, آماره‌ی t و t بحرانی مربوط به معادلات ۲۱ تا ۲۴ مختص کرمان.

ماه	$\bar{H}_{i,m}$	Eq.(۲۱)		Eq.(۲۲)		Eq.(۲۳)		Eq.(۲۴)	
		$\bar{H}_{i,c}$	e(%)	$\bar{H}_{i,c}$	e(%)	$\bar{H}_{i,c}$	e(%)	$\bar{H}_{i,c}$	e(%)
ژانویه	۳۴۷۸	۳۴۸۴	-۰٫۱۷	۳۴۸۸	-۰٫۳۰	۳۴۸۴	-۰٫۱۸	۳۴۷۹	-۰٫۰۴
فوریه	۴۳۹۷	۴۳۶۶	۰٫۷۲	۴۳۹۵	۰٫۰۵	۴۳۶۵	۰٫۷۳	۴۳۷۴	۰٫۵۲
مارس	۵۱۰۷	۵۱۸۱	-۱٫۴۶	۵۲۰۵	-۱٫۹۱	۵۱۸۱	-۱٫۴۵	۵۱۹۶	-۱٫۷۵
آوریل	۶۳۹۰	۶۳۸۰	۰٫۱۶	۶۳۷۱	۰٫۳۰	۶۳۸۰	۰٫۱۶	۶۳۸۷	۰٫۰۴
می	۷۴۵۳	۷۴۲۷	۰٫۳۵	۷۳۸۹	۰٫۸۶	۷۴۲۷	۰٫۳۵	۷۴۲۱	۰٫۴۳
ژوئن	۷۹۲۷	۸۰۰۴	-۰٫۹۷	۷۹۹۰	-۰٫۸۱	۸۰۰۴	-۰٫۹۸	۷۹۹۱	-۰٫۸۱
ژولای	۷۸۰۷	۷۷۳۱	۰٫۹۷	۷۷۴۳	۰٫۸۱	۷۷۳۱	۰٫۹۷	۷۷۲۳	۱٫۰۷
آگوست	۷۱۹۵	۷۲۷۳	-۱٫۰۸	۷۳۰۰	-۱٫۴۶	۷۲۷۳	-۱٫۰۸	۷۲۸۰	-۱٫۱۸
سپتامبر	۶۵۵۱	۶۴۶۴	۱٫۳۲	۶۴۸۳	۱٫۰۴	۶۴۶۴	۱٫۳۲	۶۴۷۵	۱٫۱۶
اکتبر	۵۳۶۶	۵۳۵۴	۰٫۲۳	۵۳۳۹	۰٫۴۹	۵۳۵۴	۰٫۲۳	۵۳۵۸	۰٫۱۵
نوامبر	۴۲۲۳	۴۳۳۷	-۲٫۷۱	۴۳۱۵	-۲٫۱۸	۴۳۳۷	-۲٫۷۰	۴۳۲۹	-۲٫۵۳
دسامبر	۳۶۶۳	۳۵۵۶	۲٫۹۳	۳۵۳۹	۲٫۳۸	۳۵۵۶	۲٫۹۲	۳۵۴۲	۲٫۳۰
MBD		۰٫۰۰۰۲		-۰٫۱۶۷۴		۰٫۰۰۳۱		-۰٫۰۶۳	
RMSE		۶۹		۷۲		۶۹		۷۰	
t		۰٫۰۰۰۰۱		۰٫۰۰۰۷۷		۰٫۰۰۰۰۲		۰٫۰۰۰۰۳	
t-critical ($\alpha/2 = ۰٫۰۲۵, ۱۱$)		۲٫۲۰۱۰		۲٫۲۰۱۰		۲٫۲۰۱۰		۲٫۲۰۱۰	

نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج انتشار یافته توسط سایر پژوهش‌گران مقایسه شده است (جدول ۶ و ۷). در جدول ۶ نتایج به دست آمده توسط محققین با نتایج کار حاضر (برحسب ماه‌های شمسی) مقایسه شده است. [۲۷، ۲۹] ضمناً برای این که مقایسه‌ی فوق معنی‌دار باشد مقدار ثابت خورشیدی بالای جو در محاسبات مدل معادل 1353 W/m^2 در نظر گرفته شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر حاصل از کار حاضر انحراف کم‌تری نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. در جدول ۷ نیز مقایسه‌ی مشابهی بین نتایج حاصل از کار حاضر با نتایج به دست آمده توسط دیگر محققین برحسب ماه‌های میلادی انجام شده است. [۲۷، ۲۹] این بار نیز مقادیر حاصل از کار حاضر انحراف کم‌تری نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

داده‌های مربوط به پارامترهای هواشناسی برای شهر کرمان از سازمان هواشناسی کشور (IMO) دریافت و مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. صدها نوع رابطه با نتایج تجربی مقایسه، و روابطی که بیشترین ضریب همبستگی R را داشتند انتخاب شدند. ضریب رابطه و ضرایب رگرسیون برای هر یک از روابط انتخاب شده محاسبه شد. برای روابطی با دو متغیر مقدار ضریب همبستگی R بین ۹۴ تا ۹۵ درصد، و برای رابطه‌ی با هفت متغیر بین ۹۷ تا ۹۸ درصد به دست آمد و میزان خطا از ۳٫۲۳ درصد تجاوز نکرد.

روابط رگرسیون چندجمله‌یی که منجر به پیش‌بینی دقیق تابش کل روزانه خورشید بر سطوح افقی می‌شوند شناسایی شدند. براین اساس رابطه‌ی رگرسیون چندجمله‌یی با متغیرهای هفت‌گانه $P, H, \sin \delta, n/N, R_h, T_{max}, T_{dp, max}$ واجد بیشترین مقدار ضریب همبستگی $R=0.97984$ است. دقت پیش‌بینی‌ها از روابط دیگر بیشتر است. مقادیر MBD (-0.331 W/m^2) و نیز مقادیر RMSE (7 W/m^2) در محدوده‌ی قابل قبولی قرار دارند. این نشان می‌دهد که کاربرد این مدل برای برآورد شدت تابش کل روزانه یا ماهانه در کرمان از دقت کافی برخوردار است. به علاوه تا زمانی که تابش خورشیدی در ایستگاه‌های بیشتری مورد اندازه‌گیری قرار گیرد، می‌توان با اطمینان کافی از رابطه‌ی پیشنهادی درمورد نواحی فاقد این قبیل داده‌ها استفاده کرد.

به‌منظور برآورد عملکرد سیستم‌های خورشیدی که از توجه روزافزونی در کرمان برخوردارند می‌توان از شدت تابش کل خورشیدی محاسبه شده استفاده کرد. اعتبار روابط رگرسیون خطی برای تابش کل خورشیدی را می‌توان با کاربرد روابط به دست آمده در این پژوهش درمورد داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی قرار داد.

فهرست علائم

e: درصد خطای نسبی

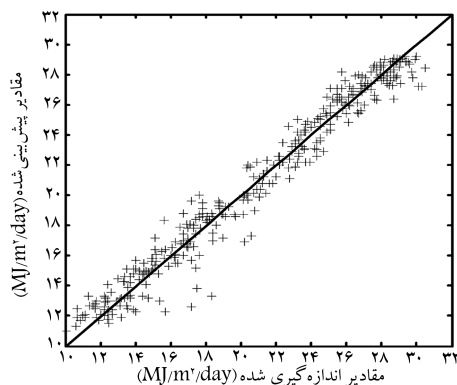
R: ضریب همبستگی

G_o: ثابت خورشیدی بالای جو (1367 W/m^2)

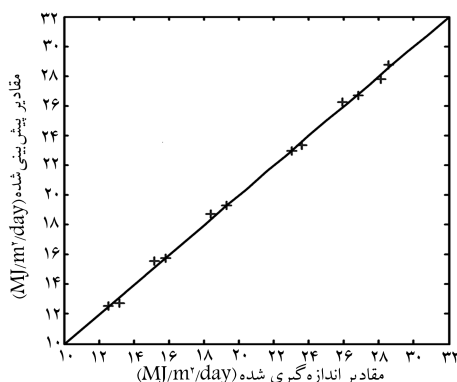
R_h: میانگین روزانه رطوبت نسبی

H: میانگین روزانه شدت تشعشع خورشیدی دریافتی (W/m^2)

RMSE: جذر میانگین مربعات خطای مقادیر مدل و اندازه‌گیری شده



شکل ۸. نمودار پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل برای ۳۶۵ روز.



شکل ۹. نمودار پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل برای ۱۲ ماه.

جدول ۴. مقادیر e, MBD, RMSE, آماره‌ی t و مقادیر t بحرانی مربوط به معادله‌ی ۲۵ مختص کرمان.

ماه	Eq.(۲۵)	
	$\bar{H}_{i,m}$	$\bar{H}_{i,c}$ e(%)
ژانویه	۳۴۷۸	۳۴۸۴ -۰٫۱۶
فوریه	۴۳۹۷	۴۳۶۹ ۰٫۶۳
مارس	۵۱۰۷	۵۱۹۴ -۱٫۷۱
آوریل	۶۳۹۰	۶۳۸۶ ۰٫۰۶
می	۷۴۵۳	۷۴۲۰ ۰٫۴۴
ژوئن	۷۹۲۷	۷۹۹۴ -۰٫۸۴
جولای	۷۸۰۷	۷۷۱۹ ۱٫۱۳
آگوست	۷۱۹۵	۷۲۸۱ -۱٫۱۹
سپتامبر	۶۵۵۱	۶۴۸۲ ۱٫۰۴
اکتبر	۵۳۶۶	۵۳۵۸ ۰٫۱۴
نوامبر	۴۲۲۳	۴۳۲۳ -۲٫۳۹
دسامبر	۳۶۶۳	۳۵۴۵ ۳٫۲۳
MBD		-۰٫۳۳۱
RMSE		۷
t		۰٫۰۰۱۶
t-critical($\alpha/2 = 0.025, 11$)		۲٫۲۰۱۰

جدول ۵. مقایسه‌ی شدت کل تابش خورشید اندازه‌گیری شده در یک روز خاص ($H_{s,d}$) با مقدار متوسط روزانه در همان ماه ($\bar{H}_{i,m}$) و مقدار پیش‌بینی شده حاصل از مدل ($\bar{H}_{i,c}$).

روز مشخص	$H_{s,d}$	$\bar{H}_{i,m}$	$e(\%) (H_{s,d} \& \bar{H}_{i,m})$	$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%) (H_{s,d} \& \bar{H}_{i,c})$
ژانویه ۱۷	۳۴۴۶	۳۴۷۸	۰٫۹۲	۳۴۸۴	۱٫۰۹
فوریه ۱۶	۴۷۲۱	۴۳۹۷	-۷٫۳۷	۴۳۶۹	-۸٫۰۶
مارس ۱۶	۵۲۱۴	۵۱۰۷	-۲٫۱۰	۵۱۹۴	-۰٫۳۹
آوریل ۱۵	۶۵۳۷	۶۳۹۰	-۲٫۳۰	۶۳۸۶	-۲٫۳۶
می ۱۵	۷۵۳۷	۷۴۵۳	-۱٫۱۳	۷۴۲۰	-۱٫۵۸
ژوئن ۱۱	۷۹۳۰	۷۹۲۷	-۰٫۰۴	۷۹۹۴	۰٫۸۰
جولای ۱۷	۷۷۴۷	۷۸۰۷	۰٫۷۷	۷۷۱۹	-۰٫۳۶
آگوست ۱۶	۷۳۲۵	۷۱۹۵	-۱٫۸۱	۷۲۸۱	-۰٫۶۰
سپتامبر ۱۵	۶۴۳۵	۶۵۵۱	۱٫۷۷	۶۴۸۲	۰٫۷۳
اکتبر ۱۵	۵۳۲۰	۵۳۶۶	۰٫۸۶	۵۳۵۸	۰٫۷۱
نوامبر ۱۴	۴۱۶۲	۴۲۲۳	۱٫۴۴	۴۳۲۳	۳٫۷۲
دسامبر ۱۰	۳۵۳۳	۳۶۶۳	۳٫۵۵	۳۵۴۵	۰٫۳۴

جدول ۶. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده توسط محققین با نتایج مدل شدت کل تابش خورشیدی ($\text{MJ/m}^2/\text{Day}$). [۴۹،۴۷]

ماه	اندازه‌گیری شده	صفاری پور [۴۷]	بهادری نژاد [۴۹]	مدل پیشنهادی
فروردین	۲۱٫۵۴	۲۱٫۴۳	۲۱٫۲۰	۲۱٫۵۲
اردیبهشت	۲۵٫۵۰	۲۴٫۷۶	۲۴٫۸۱	۲۵٫۴۸
خرداد	۲۸٫۱۴	۲۷٫۷۲	۲۷٫۱۷	۲۸٫۳۷
تیر	۲۸٫۶۶	۲۸٫۹۴	۲۸٫۲۹	۲۸٫۳۲
مرداد	۲۶٫۴۸	۲۶٫۷۱	۲۷٫۲۷	۲۶٫۷۴
شهریور	۲۴٫۳۶	۲۳٫۶۴	۲۴٫۰۰	۲۴٫۲۵
مهر	۲۰٫۵۸	۲۰٫۰۷	۱۹٫۴۷	۲۰٫۳۹
آبان	۱۶٫۳۸	۱۵٫۳۷	۱۵٫۰۶	۱۶٫۵۳
آذر	۱۳٫۸۰	۱۲٫۲۹	۱۲٫۱۲	۱۳٫۴۵
دی	۱۱٫۹۴	۱۲٫۲۱	۱۱٫۲۱	۱۲٫۳۴
بهمن	۱۴٫۶۵	۱۴٫۵۰	۱۳٫۹۲	۱۴٫۵۴
اسفند	۱۷٫۵۷	۱۷٫۴۰	۱۶٫۶۲	۱۷٫۶۶
متوسط سالانه	۲۰٫۸۰	۲۰٫۴۲	۲۰٫۱۰	۲۰٫۸۰
MAPE				۱٫۰۵
RMSE				۰٫۲۲

جدول ۷. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده توسط برخی از محققین با نتایج مدل. [۵۰،۴۷،۴۳]

ماه	مدل	سبزی پرور [۵۰]	صفاری پور [۴۷]	دانشیار [۴۳]	داده‌های تجربی
ژوئن	۱۲٫۵۴	۱۳٫۰۳	۱۲٫۹۱	۱۰٫۶۳	۱۲٫۵۲
فوریه	۱۵٫۷۳	۱۴٫۹۶	۱۵٫۸۴	۱۳٫۹۰	۱۵٫۸۳
مارس	۱۸٫۷۰	۱۶٫۲۴	۱۸٫۵۱	۱۷٫۲۵	۱۸٫۳۸
آوریل	۲۲٫۹۹	۱۹٫۱۳	۲۲٫۵۵	۱۹٫۶۳	۲۳٫۰۰
می	۲۶٫۷۱	۲۳٫۷۵	۲۵٫۸۵	۲۴٫۲۴	۲۶٫۸۳
ژوئن	۲۸٫۷۸	۲۸٫۵۱	۲۷٫۹۳	۲۶٫۷۱	۲۸٫۵۴
جولای	۲۷٫۷۹	۲۹٫۹۹	۲۷٫۴۸	۲۶٫۲۵	۲۸٫۱۰
آگوست	۲۶٫۲۱	۲۸٫۹۹	۲۶٫۱۲	۲۵٫۰۴	۲۵٫۹۰
سپتامبر	۲۳٫۳۴	۲۷٫۷۱	۲۳٫۲۲	۲۱٫۶۰	۲۳٫۵۸
اکتبر	۱۹٫۲۹	۲۰٫۱۴	۱۸٫۹۴	۱۷٫۱۲	۱۹٫۳۲
نوامبر	۱۵٫۵۶	۱۵٫۸۹	۱۴٫۹۰	۱۳٫۰۲	۱۵٫۲۰
دسامبر	۱۲٫۷۶	۱۲٫۵۵	۱۲٫۰۷	۱۰٫۴۶	۱۳٫۱۹
Yearly	۲۰٫۸۷	۲۰٫۹۱	۲۰٫۵۳	۱۸٫۸۲	۲۰٫۸۷
MAPE					۱٫۰۸
RMSE					۰٫۲۵

ω_s : زاویه ساعت طلوع خورشیدی
 N: طول روز
 φ : عرض جغرافیایی محل

\bar{H} : میانگین ماهیانه مقادیر روزانه شدت تشعشع خورشیدی دریافتی (W/m^2)
 t: آماره آزمون
 H_o : میانگین روزانه شدت تشعشع خورشیدی بالای جو (W/m^2)
 $T_{dp,max}$: میانگین روزانه حداکثر درجه حرارت نقطه شبنم هوا ($^{\circ}C$)
 MAPE: میانگین درصد خطای مطلق
 T_{max} : میانگین روزانه حداکثر درجه حرارت هوا ($^{\circ}C$)
 MBD: میانگین تغییرات دومقدار
 δ : زاویه میل خورشید
 n: میزان واقعی ساعات آفتابی

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از سازمان محترم هواشناسی کشور (مرکز کرمان) به خاطر همکاری صمیمانه در واگذاری فایل‌ها و مدارک موجود در آرشیو آن سازمان مربوطه به داده‌های مورد نیاز جهت انجام این پژوهش مراتب تشکر و قدردانی خود را ابراز می‌نماید.

منابع

1. Ertekin, C., and Yaldiz, O. "Estimation of monthly average daily global radiation on horizontal surface for Antalya, Turkey", *Renew Energy*, **17**, pp. 95-102 (1999).
2. Angstrom A. "Solar and terrestrial radiation", *Quart J. Roy Meteor Soc*, pp. 50-121 (1924).
3. Prescott J.A. "Evaporation from a water surface in relation to solar radiation", *Trans Roy Soc South Austr*, pp. 64-114 (1940).
4. Page J.K. "The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitude $40^{\circ}N-40^{\circ}S$," In: *Proceedings of United Nations conference on new sources of energy* (1964).
5. Lof, G.O.G.; Duffie, J.A., and Smith, C. "World distribution of solar radiation", *Sol Energy*, **10**, pp. 27-37 (1966).
6. Rietveld, M.R. "A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine", *Agr Meteorol*, **19**, pp. 243-52 (1978).
7. Soler, A. "Statistical comparison for 77 European stations of sunshine based models", *Sol Energy*, **45**, pp. 365-70 (1990).
8. Turon, S.M. "The relationship between total irradiation and sunshine duration in the humid tropics", *Sol Energy*, **38**, pp. 353-354 (1987).
9. Hutchinson M.F.; Booth, T.H.; McMahon, J.P., and Nix, H.A. "Estimating monthly mean value of daily total solar radiation for Australia", *Sol Energy*, **32**, pp. 277-290 (1984).
10. Haluoani, N.; Nguyen, C.T., and Vo-Ngoc, D. "Calculation of monthly average global solar radiation on horizontal surfaces using daily hours of bright sunshine", *Sol Energy*, **50**, pp.246-58, (1993).
11. Ma, C.C.Y., and Iqbal, M. "Statistical comparison of solar radiation correlations, monthly average global and diffuse radiation on horizontal surfaces", *Sol Energy*, **33**, pp. 143-8 (1984).
12. Orozco, E.B. "Guatemalan solar map", *Sol Wind Tecnol*, **4**, pp. 381-8 (1967).
13. Feuilard, T., and Aillion, J.M. "Relationship between global solar irradiation and sunshine duration in Guadeloupe", *Sol Energy*, **43**, pp. 356-61 (1989).
14. Ledanois, J. M., and Prieto A. "A new solar map of Venezuela", *Sol Energy*, **41**, pp. 115-26 (1988).
15. Alaruri, S.D., and Amer, M.F. "Empirical regression models for weather data measured in Kuwait during the years 1985, 1986 and 1987" *Sol Energy*, **50**, pp. 229-233 (1993).
16. Amad, I.; Al-Hamadani, N., and Ibrahim, K. "Solar radiation maps for Iraq", *Sol Energy*, **31**, pp. 29-44 (1983).
17. Kamel, M.A.; Shalaby, S.A., and Mostafa, S.S. "Solar radiation over Egypt: comparison of predicted and measured meteorological data", *Sol Energy*, **50**, pp. 463-7 (1993).
18. Tadros, M.T.Y. "Uses of sunshine duration to estimate the global solar radiation over eight meteorological stations in Egypt", *Renew Energy*, **21**, pp.231-46 (2000).
19. Tiris, M.; Tiris, C., and Ture, E. "Correlations of monthly average daily global, diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in Gebze," *Energy Convers Manage*, **37**, pp. 1417-1421, (1996).
20. Togrul, I.T.; Togrul, H., and Evin, D. "Estimation of global solar radiation under clear sky radiation in Turkey", *Renew Energy*, **21**, pp. 271-87 (2000).
21. Samuel, T.D.M.A. "Estimation of global radiation for Srilanka," *Sol Energy*, **47**, pp.333-337 (1991).
22. Hawas, M.M., and Muneer, T. "Correlation between global radiation and sunshine data for India," *Sol Energy*, **30**, pp. 289-290 (1983).
23. Raja, I.A., and Twidell, J.W. "Distribution of global insulation over Pakistan", *Sol Energy*, **43**, pp. 335-357 (1989).

24. Ezekwe, C.I., and Ezeilo Clifford C.O. "Measured solar radiation in a Nigerian environment compared with predicted data", *Sol Energy*, **26**, pp. 181-186 (1981).
25. Khogali, A. "Solar radiation over Sudan-comparison of measured and predicted data", *Sol Energy*, **31**, pp. 41-53 (1983).
26. Gopinathan, K.K. "Estimation of hourly global and diffuse solar radiation from hourly sunshine duration", *Sol Energy*, **48**, pp. 3-5 (1992).
27. Leung, C.T. "The fluctuation of solar irradiance in Hong Kong", *Sol Energy*, **25**, pp. 485-494, (1980).
28. Newland, F.J. "A study of solar radiation models for the coastal region of South China", *Sol Energy*, **43**, pp. 227-235 (1989).
29. Excell, R.H.B. "The solar radiation climate of Thailand" *Sol Energy*, **18**, pp. 249-354 (1976).
30. Chuah, G.S., and Donald, Lee S.L. "Solar radiation estimates in Malaysia", *Sol Energy*, **26**, pp. 33-40 (1981).
31. Goh, T.N. "Statistical study of solar radiation information in an equatorial region (Singapore)", *Sol Energy*, **22**, pp. 105-111 (1979).
32. Nguyen, B.T., and Proyor, T.L. "The relationship between global solar radiation and sunshine duration in Vietnam", *Renew Energy*, **11**, pp. 47-60 (1997).
33. Lin, W., and Lu, E. "Correlations between monthly average global solar radiation on horizontal surfaces and relative duration of sunshine in Yunnan province, China", *Renewable Energy*, **13**, pp. 355-362 (1998).
34. Singh, O.P.; Srivastava, S.K., and Guar, A. "Empirical relationship to estimate global radiation from hours of sunshine", *Energy Conversion Manage*, **37**, pp. 501-504 (1996).
35. Sezai, I., and Tasdemiroglu, E. "Evaluation of the meteorological data in north Cyprus", *Energy Conversion Manage*, **36**, pp. 253-261 (1995).
36. Reddy S. J., An empirical method for estimation of the total solar radiation, *Sol Energy*, **13**, pp.289-290 (1971).
37. Sayigh, A.A. *Solar energy engineering*, New York: Academic Press (1977).
38. Ododo, J.C., and Usman, A. "Correlation of total solar radiation with common meteorological parameters for Yola and Calabar, Nigeria", *Energy Conversion Manage*, **37**, pp. 521-530 (1996).
39. Sabbagh, J.A.; Sayigh, A.A., and El-Salam, M.A. "Estimation of the total solar radiation from meteorological data", *Sol Energy*, **19**, pp. 307-311 (1977).
40. Togrul, I.T., and Onat, E. "A study for estimating solar radiation in Elazing using geographical and meteorological data", *Energy Conversion Manage*, **40**, pp. 1577-1584 (1999).
41. Trabea, A.A., and Shaltout, M.A.M. "Correlation of global solar radiation with meteorological parameters over Egypt", *Renewable Energy*, **21**, pp. 297-308 (2000).
42. Ertekin, C., and Yaldiz, O. "Estimation of monthly average daily global radiation on horizontal surface for Antalya, Turkey", *Renewable Energy*, **17**, pp. 95-102 (1999).
43. Daneshyar, M. "Solar radiation statistics for Iran", *Solar Energy*, **21**, pp.345-349 (1978).
44. Samimi, J. "Estimation of height-dependent solar irradiation and application to the Solar climate of Iran", *Solar Energy*, **52**, pp. 401-409 (1994).
45. Jafarpour, K., and Yaghoubi, M.A. "Solar radiation for Shiraz, Iran", *Sol Wind Technology*, **62**, pp. 177-179 (1989).
46. Ashjaee, M.; Roomina, M.R., and Ghafourian-Azar, R. "Estimating direct, diffuse, global solar radiation for various cities in Iran by two methods and their comparison with the measured data", *Solar Energy*, **50**, pp. 441-446 (1993).
47. Saffaripour, M.H. *Availability of solar energy in Kerman and development of empirical formula to predict solar radiation intensity in Kerman Province*, MS thesis (in Persian), Mechanical Engineering Dept., Shahid Bahonar University of Kerman, Iran (1995).
48. Yaghoubi, M.A., and Sabzevari, A. "Further data on solar radiation in Shiraz, Iran" *Renewable Energy*, **4**, pp. 393-399 (1996).
49. Bahadori, M.N., and Mirhosseini, S.A. "Solar radiation data for various cities in Iran" (in Persian), presented at the *Third Conference on Optimization of Fuel Consumption in Building*, pp. 603-619 (2004).
50. Sabziparvar, A.A. "A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran", *Renewable Energy*, **33**:1002-1010 (2008).
51. Simidchiev, D.A. "Compendium of lecture notes on meteorological instruments for training class III and class IV meteorological personnel," World Meteorological Organization, Volume I, World Meteorological Organization (622), Geneva, Switzerland (1986).
52. Freund, J.E. *Mathematical Statistics*, Prentice Hall of India (2000).
53. Duffie, J.A., and Beckman, W.A. *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY (1991).

