

بررسی اثر عوامل نجومی، هندسی، جغرافیایی و هواشناسی بر میزان تابش کل خورشیدی روزانه دریافتی در یک سطح افقی در شهر کرمان

محمدحسن صفاری پور^۱، مظفرعلی مهربان^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید با هنر کرمان m.h.saffaripour@mail.uk.ac.ir
^۲ آستاد، دانشگاه شهید با هنر کرمان ma_mehrabian@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش اثر عوامل نجومی، هندسی، جغرافیایی و هواشناسی بر میانگین مقدار کل روزانه تابش خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به مقدار کل تابش خورشیدی و همچنین مشخصات نجومی، جغرافیایی، هندسی و هواشناسی شهر کرمان که توسط سازمان هواشناسی ایران (IMO) تهیه شده استفاده گردید. تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی نشان داد که میانگین روزانه مقدار کل تابش خورشیدی بر روی یک سطح افقی باهشت عامل نجومی، هندسی، جغرافیایی و هواشناسی ارتباط دارد. این عوامل عبارتند از: (۱) سینوس زاویه میل خورشید، (۲) فشار هوا، (۳) درجه حرارت زمین، (۴) میانگین روزانه حداکثر درجه حرارت هوا، (۵) میانگین روزانه حداکثر درجه حرارت نقطه شبنم هوا، (۶) میانگین روزانه رطوبت نسبی، (۷) نسبت تعداد واقعی ساعات آفتابی به طول روز و (۸) میانگین روزانه شدت تشعشع خورشیدی بالای جو. هشت رابطه رگرسیون خطی هر کدام شامل یکی از عوامل فوق برای پیش‌بینی میانگین مقدار کل تابش خورشیدی روزانه بر روی یک سطح افقی پیشنهاد گردید. نتایج حاصله نشان داد که در بین عوامل فوق عامل (۱) بیشترین تاثیر و عامل (۷) کمترین تاثیر را بر روی تابش خورشیدی دارند. آنالیز خطا شامل خطای نسبی، میانگین تغییرات دومقدار و جذر میانگین مربعات تغییرات دو مقدار برای هر یک از مدل‌های هشت‌گانه انجام گردید. مدل‌های پیشنهاد شده در این پژوهش، همچنین قابل استفاده در مناطقی است که داده‌های مقدار کل تابش خورشیدی در آنها موجود نیست ولی عوامل هشت‌گانه مدل را می‌توان در خارج از ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری نمود. انتخاب مدل مناسب بستگی به دقت مورد انتظار برای پیش‌بینی تابش خورشیدی دریافتی خواهد داشت.

کلمات کلیدی: زاویه میل، ساعات آفتابی، تابش کل، رگرسیون خطی، درجه حرارت زمین

مقدمه

مطالعات زیادی برای برآورد مقدار کل انرژی تابشی دریافتی بر روی یک سطح افقی انجام شده است. نخستین رابطه تجربی توسط آنگستروم [۱] پیشنهاد گردید، که در آن مقدار کل تابش خورشیدی با نسبت ساعات آفتابی مرتبط است. رابطه آنگستروم توسط

پرسکات [۲] و بعدها توسط پیچ [۳] اصلاح گردید. روابط اصلاح شده هنوز برای برآورد مقدار کل تابش خورشیدی در سطح وسیعی به کار می‌روند.

توزیع تابش خورشیدی در سطح جهان بوسیله لاف و همکاران [۴] مورد مطالعه قرار گرفت. تلاش‌های زیادی برای پیدا کردن مدل‌های عمومی که در تمام کشورهای جهان [۵] و در نواحی بزرگی از جهان مانند اروپا و کشورهای گرم و مرطوب کاربرد داشته باشند انجام گرفته است. علاوه بر این، رابطه آنگستروم در سطح ملی در بسیاری از کشورهای جهان آزمایش شده است. محققین بسیاری زاویه میل خورشیدی و عرض جغرافیایی را برای برآورد میزان تابش خورشیدی بکار برده‌اند.

صفاری پور و مهربان [۶] مدل‌های تحلیلی دیگر محققین را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و با توجه به داده‌های تجربی، بعضی از این مدل‌ها را برای شرایط آب و هوایی ایران کالیبره نمودند. صفاری پور و مهربان در پژوهشی دیگر [۷] با به‌کارگیری روش رگرسیون مرکب تاثیر توأمان عوامل هندسی، جغرافیایی، نجومی، و هواشناسی را بر میزان تابش خورشیدی دریافتی در شهر یزد مورد بررسی قرار دادند و با ارائه یک مدل هفت پارامتری شدت تابش کلی روزانه را با دقت بسیار زیادی پیش‌بینی نمودند.

صمیمی [۸] مدلی برای پیش‌بینی تابش خورشید در شهرهای ایران بر حسب ارتفاع ارائه داد. او پارامترهای مدل را از راه انطباق با داده‌های اندازه‌گیری شده موجود در یک شهر خاص بدست نیاورد بلکه بر مبنای اصول کلی انتخاب نمود. مقادیر پیش‌بینی شده در این مدل مطابقت خوبی با اندازه‌گیری‌های تجربی در یک دوره ۱۷ ساله در تهران و همچنین داده‌های تجربی در دوره‌های کوتاه‌تر در شهرهای دیگر نشان داد. از داده‌های IMO برای برقراری رابطه ساده‌ای بین ساعات آفتابی و پوشش ابر استفاده گردید. چنین رابطه‌ای برای برآورد تابش خورشید در جاهایی که فاقد ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده می‌باشند پیشنهاد گردید.

بهادری نژاد و میرحسینی [۹] روابطی برای تخمین متوسط ماهانه ضریب صافی هوا در شهرهای مختلف ایران پیشنهاد نمودند و مقادیر ضریب صافی هوا را برای ماه‌های مختلف (از فروردین تا اسفند) محاسبه و این مقادیر را با داده‌های تجربی و مقادیر بدست آمده از روش‌های پیشنهادی سایر پژوهشگران مقایسه نمودند.

سبزی پرور [۱۰] سه مدل تابشی را برای پیش بینی متوسط ماهانه تابش خورشیدی روزانه بر روی سطوح افقی اصلاح نمود. این مدل ها مختص ناحیه خشک در مرکز ایران می باشند. اصلاح مدل ها با وارد کردن ارتفاع، تعداد کل روزهای غبارآلود، و تغییرات فصلی فاصله خورشید- زمین انجام گرفت. سبزی پرور نشان داد که مدل اصلاح شده صباغ تابش کل خورشیدی را در نواحی خشک و نیمه خشک با دقت خوبی تقریب می زند. سبزی پرور همچنین رابطه ای برای پیش بینی تابش خورشیدی بر حسب ارتفاع برای شهرهاییکه داده های اندازه گیری در دسترس نمی باشد ارائه داد.

نوربان [۱۱] عملکرد ۱۲ مدل را برای برآورد تابش پخشی ساعتی بر روی سطوح مایل از روی داده های تجربی مربوط به تابش پخشی بر روی سطوح افقی ارزیابی نمود. تابش کل بر روی یک سطح مایل از سه مولفه تشکیل می شود، تابش مستقیم، تابش پخشی و انرژی منعکس شده از زمین. مولفه تابش مستقیم را از تقسیم زاویه برخورد به زاویه سمت الراس خورشیدی میتوان بدست آورد. انرژی منعکس شده از زمین اثر ناچیزی در محاسبات دارد و با مدل های ایزوتروپی قابل محاسبه می باشد. اما مدل های پیش بینی کننده مولفه پخشی تفاوت های فاحشی نشان می دهند که نوربان روش اعتبار سنجی این مدل ها را مورد بحث قرار داد. ۱۲ مدل مختلف در مقابل داده های واقعی بر روی یک صفحه مایل رو به جنوب و یک صفحه مایل رو به غرب در شهر کرج مورد آزمون قرار گرفتند. شاخص های آماری نشان دادند که تمام مدل ها برای سطح مایل رو به غرب خطای بزرگی را تولید می نمایند، در حالیکه مدل هابرای سطوح رو به جنوب هم خوانی خوبی نشان می دهند.

در این مقاله با به کار گیری روش رگرسیون خطی روابطی بین مقدار کل تابش خورشیدی و پاره ای از عوامل نجومی، جغرافیایی، هندسی و هواشناسی برقرار نموده و برای مقایسه میزان تاثیر این عوامل نسبت به یکدیگر به تجزیه و تحلیل آن روابط می پردازیم. عوامل بکاررفته در این مدل های پیش بینی کننده (روابط تجربی) عبارتند از شدت روزانه تابش خورشیدی بالای جو، نسبت ساعات آفتابی روزانه، رطوبت نسبی متوسط روزانه، متوسط روزانه حداکثر درجه حرارت هوا، متوسط روزانه حداکثر نقطه شبنم هوا، درجه حرارت زمین در عمق ۵ سانتیمتری زمین، متوسط روزانه فشار اتمسفری و شیب زاویه میل خورشیدی. ضرایب مربوط به معادلات مدل را بدست آورده، مقادیر کل تابش خورشیدی را با توجه به معادلات مدل محاسبه نموده و با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه می کنیم. این مقایسه نشان خواهد داد که در بین عوامل هشتگانه فوق کدام یک تاثیر بیشتری بر میزان تابش خورشیدی دریافتی خواهد داشت. ضمناً هشت مدل برای پیش بینی میزان انرژی خورشیدی دریافتی ارائه خواهد شد که کاربر می تواند متناسب با دقت مورد انتظار خود مدل مناسب را انتخاب نماید.

روش استخراج داده های تجربی

به منظور تحلیل روابط بین مقدار کل روزانه تابش خورشیدی و مشخصات نجومی، جغرافیایی، هندسی و هواشناسی، اطلاعات دریافت شده از IMO که در ایستگاه هواشناسی واقع در فرودگاه بین المللی کرمان بدست آمده اند، مورداستفاده قرار گرفته است. این فرودگاه در $30^{\circ}15'$ عرض شمالی و $56^{\circ}38'$ طول شرقی و ارتفاع ۱۷۵۴ متر از سطح دریا قرار دارد. اطلاعات اخذ شده از (IMO) خصوصاً درجه حرارت ماکزیمم، مقادیر ساعات آفتابی و مقدار تابش کل روزانه بعنوان مقادیر مرجع جهت مقایسه مقادیر پیش بینی شده توسط مدل بکار گرفته شده اند. اطلاعات مربوط به هریک از عوامل فوق الذکر در دوره های طولانی به شرح زیر موجود بوده و در اختیار محققین قرار داده شده اند: درجه حرارت ماکزیمم، نقطه شبنم و رطوبت نسبی طی یک دوره ۴۵ ساله (۱۹۶۱ لغایت ۲۰۰۵ میلادی)، مقادیر ساعات آفتابی با استفاده از آفتاب نگار کیمبال استوکس طی یک دوره ۴۱ ساله (۱۹۶۵ لغایت ۲۰۰۵ میلادی)، دمای زمین طی یک دوره ۱۴ ساله (۱۹۹۲ لغایت ۲۰۰۵ میلادی) و مقدار تابش کل روزانه انرژی خورشیدی با استفاده از پیرانومتر مدل ۶۸۱-۱-CC ساخت کارخانه Kipp & Zonen هلند طی یک دوره ۲۲ ساله (۱۹۸۴ لغایت ۲۰۰۵ میلادی).

عوامل مؤثر بر میزان تابش خورشیدی دریافتی:

انرژی خورشیدی به فراوانی در ایران یافت می شود. انرژی تابشی ورودی به زمین در کرمان در حدود $7625 MJ/m^2$ ، تعداد ساعات آفتابی و ساعات ابری در سال به ترتیب ۳۱۵۷ و ۱۲۲۳ می باشد. عوامل مؤثر بر میزان تابش خورشیدی دریافتی را میتوان به پنج گروه یعنی عوامل هندسی، نجومی، آب و هوایی، جغرافیایی و فیزیکی تقسیم نمود [۱۲].

الف- عوامل هندسی شامل زاویه سمت الراس، زاویه ارتفاع خورشید، زاویه عزیمت خورشید، شیب سطح دریافت کننده، زاویه سمت گیرنده، و ...

ب- عوامل نجومی شامل مقدار ثابت خورشیدی، فاصله بین زمین و خورشید، زاویه میل خورشید، زاویه ساعت، میانگین روزانه شدت تشعشع خورشیدی بالای جو، و ...

ج- عوامل آب و هوایی شامل مقدار ابر، درجه حرارت هوا، نقطه شبنم هوا، دمای زمین، نسبت تعداد واقعی ساعات آفتابی به طول روز، و ...

د- عوامل جغرافیایی شامل عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا در محل دریافت کننده (میانگین فشار هوای محیط)، و ...

ح- عوامل فیزیکی شامل ضریب خاموشی اتمسفر ریلی، میزان بخار آب موجود در اتمسفر، ضریب کدری، میزان اوزون در اتمسفر، و ...

در این پژوهش تاثیر بعضی از این عوامل بر میزان تابش خورشیدی دریافتی در کرمان مورد بررسی قرار می گیرد. این عوامل با شماره های (۱) تا (۸) در چکیده و به صورت ایتالیک در این قسمت

مشخص شده اند. برخی از عوامل فوق به موجب معادلاتی به یکدیگر و یا به عوامل دیگری که در این قسمت به آنها نیز اشاره شد، مرتبطند. ذیلا پاره ای از این معادلات را معرفی می کنیم:

$$\delta = 23.45 \sin[360(284 + n^*) / 365] \quad (1)$$

که در آن δ زاویه میل خورشید و n^* شماره روز سال از اول ژانویه می باشد.

$$N = 2\omega_s / 15 \quad (2)$$

که در آن N حداکثر تعداد ساعات آفتابی مقدور از طلوع تا غروب خورشید و ω_s زاویه ساعت طلوع (غروب) خورشید می باشد که از معادله زیر محاسبه می شود:

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

که در آن ϕ عرض جغرافیایی محل می باشد.

$$H_0 = (24 \times 3600 G_{SC} / \pi) \times f \times [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi \omega_s / 180) \sin \phi \sin \delta] \quad (4)$$

که در آن f ضریب تصحیح خارج از مرکز مدار زمین است و از معادله زیر به دست می آید:

$$f = [1 + 0.033 \cos(360n^* / 365)] \quad (5)$$

روش رگرسیون خطی و معرفی خطاها:

هدف از این پژوهش بدست آوردن روابط آماری برای تقریب زدن تابش کل روزانه خورشید با استفاده از رگرسیون خطی یک جمله ای برحسب هریک از پارامترهای هشت گانه می باشد. برای تحقق هدف فوق داده های تجربی مورد استفاده قرار گرفتند. ضمنا نتایج نهایی بصورت متوسط ماهانه ارائه می گردند. در رگرسیون خطی، وقتی از یک متغیر مستقل استفاده نمائیم، رابطه ای به شکل زیر برای متغیر وابسته خواهیم داشت:

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

که در آن b ضریب رگرسیون و x پارامتر مستقل مؤثر در مسئله می باشند. هر یک از عوامل هشت گانه فوق بصورت جداگانه بعنوان پارامتر مستقل و میزان تابش کل خورشیدی دریافتی بعنوان متغیر وابسته بکار می روند. مقادیر پیش بینی شده در هر رابطه رگرسیون از طریق ضریب همبستگی R با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه شدند. ضریب همبستگی R یک معیار آماری است و مطابق رابطه زیر تعریف می شود.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n H_{i,m} H_{i,c} - \sum_{i=1}^n H_{i,m} \sum_{i=1}^n H_{i,c}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n H_{i,m}^2 - (\sum_{i=1}^n H_{i,m})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n H_{i,c}^2 - (\sum_{i=1}^n H_{i,c})^2}} \quad (7)$$

علاوه بر آن تغییرات بین دو مقدار مقایسه شده بوسیله پارامترهای آماری مهم یعنی درصد خطای نسبی، جذرمیانگین مربعات تغییرات دو مقدار و نیز میانگین تغییرات دو مقدار در معرض نمایش قرار گرفتند. این پارامترها معیارهای بنیادی برای دقت در سیستم های انرژی خورشیدی می باشند. درصد خطای نسبی، e عبارتست از تغییر نسبی متوسط تابش کل روزانه خورشید:

$$e = \frac{H_{i,c} - H_{i,m}}{H_{i,m}} \times 100 \quad (8)$$

جذر میانگین مربعات تغییرات دو مقدار بصورت زیر تعریف می شود:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,m} - H_{i,c})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

میانگین تغییرات دو مقدار بصورت زیر تعریف می شود:

$$MBD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{i,m} - H_{i,c}) \quad (10)$$

نتایج

تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی یک جمله ای با انتخاب هریک از پارامترهای هشت گانه بصورت مجزا بکار گرفته شد و منجر به هشت رابطه مختلف برای برآورد تابش کل خورشید گردید. برای پیداکردن ضریب رگرسیون، آنالیز رگرسیون حداقل مربعات مورد استفاده قرار گرفت. هشت رابطه با ضریب همبستگی (R) به شرح زیر برای شهر کرمان انتخاب گردید:

$$H = 20.8890 + 19.7110 \sin \delta \quad (R = 0.95943) \quad (11)$$

$$H = -1.6532 + 0.7177 H_0 \quad (R = 0.95551) \quad (12)$$

$$H = 8.3706 + 0.4388 T_G \quad (R = 0.94110) \quad (13)$$

$$H = 5.4233 + 0.6584 T_{\max} \quad (R = 0.93296) \quad (14)$$

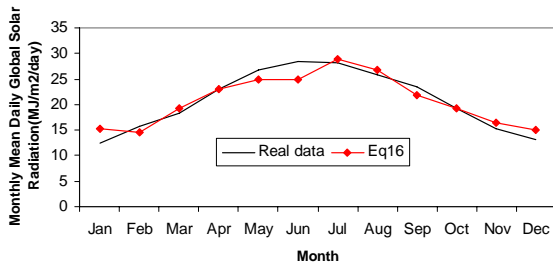
$$H = 34.8760 - 0.4274 R_h \quad (R = 0.89700) \quad (15)$$

$$H = 27.0620 + 1.9588 T_{dp, \max} \quad (R = 0.86991) \quad (16)$$

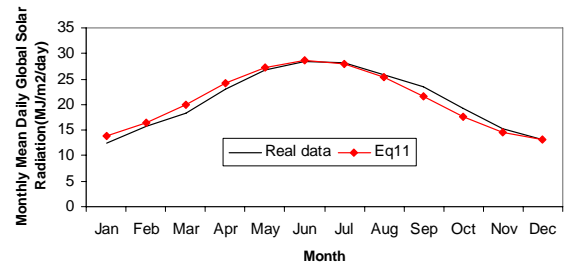
$$H = 1335.4000 - 1.5793 P \quad (R = 0.79236) \quad (17)$$

$$H = 1.5506 + 26.9420 \frac{n}{N} \quad (R = 0.43680) \quad (18)$$

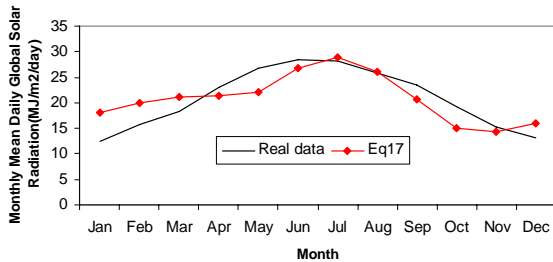
از آنجاکه روابط فوق الذکر مقادیر تابش کل روزانه را برحسب هریک از پارامترهای هشتگانه ارائه می دهند، لذا برای سهولت نتایج نهایی برآورد شده بصورت متوسط ماهانه، در شکل های (۱) الی (۸) با مقادیر اندازه گیری شده مقایسه گردیده اند. مقداری که در شکل (۱) برای H در یک ماه بخصوص (مثلاً ژانویه) به کار رفته به این ترتیب محاسبه شده: مقدار H برای تک تک روزهای آن ماه از معادله ۱۱ محاسبه شده، نتایج با یکدیگر جمع شده، و حاصل جمع بر تعداد روزهای آن ماه تقسیم شده است. این روش در مورد بقیه ماههای سال و در مورد بقیه معادلات نیز به همین شیوه اعمال گردیده است.



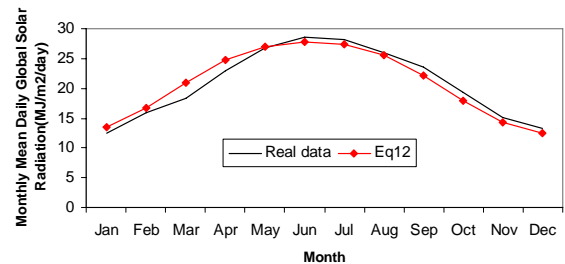
شکل (۶) مقادیر تجربی و برآوردشده با استفاده از متغیر $T_{dp,max}$



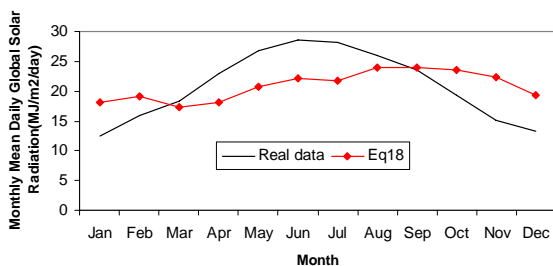
شکل (۱) مقادیر تجربی و برآوردشده با استفاده از متغیر $\sin \delta$



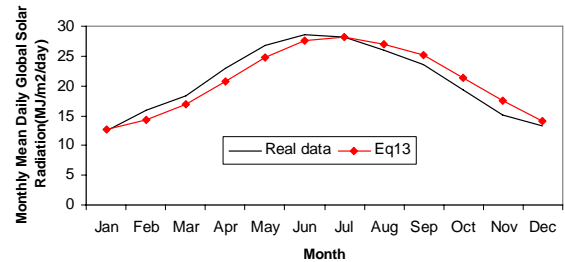
شکل (۷) مقادیر تجربی و برآوردشده با استفاده از متغیر P



شکل (۲) مقادیر تجربی و برآوردشده با استفاده از متغیر H_0



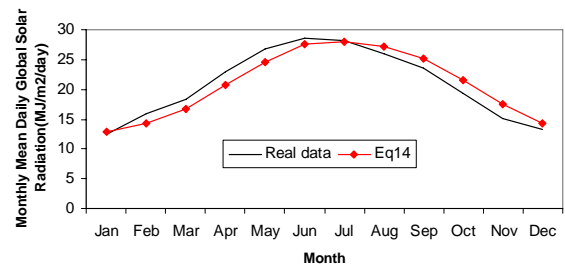
شکل (۸) مقادیر تجربی و برآوردشده با استفاده از متغیر n/N



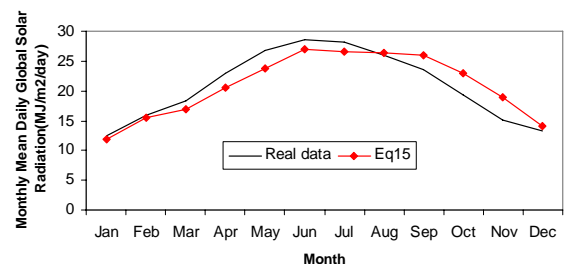
شکل (۳) مقادیر تجربی و برآوردشده با استفاده از متغیر T_G

بحث

روش رگرسیون خطی منجر به تعریف مدل هایی برای پیش بینی شدت کل تابش خورشیدی دریافتی روزانه در شهر کرمان گردید. هر یک از این مدل ها شدت کل تابش خورشیدی دریافتی (متغیر وابسته) را بر حسب یکی از عوامل هندسی، جغرافیایی، هواشناسی و نجومی در شهر کرمان (متغیر مستقل) بیان می کند. مدل های مورد نظر از راه مقایسه با داده های اندازه گیری شده توسط IMO کالیبره شدند و ضرایب آنها بدست آمد. برای بررسی دقت مدلها ضریب همبستگی (R) آنها محاسبه گردید. از آنجاکه میزان نزدیکی R به واحد معیار دقت مدل ها محسوب می شود، ملاحظه گردید که مدل خطی $H = H(\sin \delta)$ با $R = 0.95943$ بیشترین دقت و مدل $H = H(n/N)$ با $R = 0.43680$ کمترین دقت را دارا می باشد. این بررسی همچنین نشان می دهد که شدت کل تابش خورشیدی دریافتی در یک سطح افقی در درجه اول متأثر از سینوس زاویه میل خورشیدی است. این بستگی سپس بر حسب اولویت



شکل (۴) مقادیر تجربی و برآوردشده با استفاده از متغیر T_{max}



شکل (۵) مقادیر تجربی و برآوردشده با استفاده از متغیر R_h

جدول ۲ آنالیز خطا مربوط به مدل های تابشی برحسب T_G (معادله ۱۳) و T_{max} (معادله ۱۴)

Month	$\bar{H}_{i,m}$	Eq. (13)		Eq. (14)	
		$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$	$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$
January	12.52	12.71	1.52	12.81	2.32
February	15.83	14.34	-9.41	14.27	-9.85
March	18.38	16.96	-7.73	16.78	-8.71
April	23	20.83	-9.43	20.82	-9.48
May	26.83	24.74	-7.79	24.47	-8.80
June	28.54	27.50	-3.64	27.49	-3.68
July	28.1	28.11	0.04	27.96	-0.50
August	25.9	27.07	4.52	27.16	4.86
September	23.58	25.17	6.74	25.19	6.83
October	19.32	21.36	10.56	21.51	11.34
November	15.2	17.44	14.74	17.50	15.13
December	13.19	14.06	6.60	14.31	8.49
MBD		0.008333		0.01	
RMSE		1.53472		1.63406	

جدول ۳ آنالیز خطا مربوط به مدل های تابشی برحسب R_h (معادله ۱۵) و $T_{dp,max}$ (معادله ۱۶)

Month	$\bar{H}_{i,m}$	Eq. (15)		Eq. (16)	
		$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$	$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$
January	12.52	11.94	-4.63	15.34	22.52
February	15.83	15.50	-2.08	14.49	-8.46
March	18.38	16.90	-8.05	19.32	5.11
April	23	20.49	-10.91	22.93	-0.30
May	26.83	23.76	-11.44	24.85	-7.38
June	28.54	26.92	-5.68	24.93	-12.65
July	28.1	26.60	-5.34	28.94	2.99
August	25.9	26.40	1.93	26.84	3.63
September	23.58	25.99	10.22	21.81	-7.51
October	19.32	22.89	18.48	19.21	-0.57
November	15.2	18.90	24.34	16.41	7.96
December	13.19	14.14	7.20	15.06	14.18
MBD		-0.00333		0.021667	
RMSE		2.172375		1.762673	

جدول ۴ آنالیز خطا مربوط به مدل های تابشی برحسب P (معادله ۱۷) و n/N (معادله ۱۸)

Month	$\bar{H}_{i,m}$	Eq. (17)		Eq. (18)	
		$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$	$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$
January	12.52	18.20	45.37	18.14	44.89
February	15.83	20.00	26.34	19.06	20.40
March	18.38	21.16	15.13	17.40	-5.33
April	23	21.27	-7.52	18.16	-21.04
May	26.83	22.13	-17.52	20.67	-22.96
June	28.54	26.78	-6.17	22.16	-22.35
July	28.1	28.90	2.85	21.79	-22.46
August	25.9	26.09	0.73	24.04	-7.18
September	23.58	20.71	-12.17	24.00	1.78
October	19.32	15.07	-22.00	23.50	21.64
November	15.2	14.30	-5.92	22.29	46.64
December	13.19	15.96	21.00	19.38	46.93
MBD		-0.015		-0.01667	
RMSE		3.17567		4.954475	

به $H_0, T_G, T_{max}, R_h, T_{dp,max}$ و $P, n/N$ تعلق دارد. گرچه مدل هایی با $R > 0.9$ از دقت بسیار زیاد در اغلب محاسبات مهندسی برخوردارند، از مدلهایی با $R < 0.9$ نیز می توان برای محاسبات سرانگشتی بهره برد. امتیاز این مدل ها آن است که با معلوم بودن متغیر مستقل بکار رفته در هر مدل که یکی از مشخصات نجومی، هندسی، هواشناسی، و یا جغرافیایی محل مورد نظر محسوب می شود میتوان شدت کل تابش خورشیدی در آن محل را تقریب زد. مشخصات فوق برای یک محل یا معلومند و یا با ابزارهای نه چندان گران قیمت به سادگی قابل اندازه گیری می باشند. عوامل دیگری از قبیل سرعت باد و یا حتی آلاینده های موجود در هوا در شدت کل تابش خورشیدی مؤثرند و تاثیر آنها را میتوان در صورت معلوم بودن داده های تجربی با روشی شبیه آنچه در مورد عوامل هشتمانه فوق گفته شد بررسی نمود. در صد خطای نسبی حاصل از مقایسه نتایج بدست آمده از مدل های یک پارامتری (معادلات ۱۱ تا ۱۸) با نتایج واقعی و همچنین مقادیر MBD و RMSE برای معادلات ۱۱ و ۱۲ در جدول ۱، برای معادلات ۱۳ و ۱۴ در جدول ۲، برای معادلات ۱۵ و ۱۶ در جدول ۳، و برای معادلات ۱۷ و ۱۸ در جدول ۴ آمده است. ضمناً در جدول ۵ نتایج حاصل از پژوهش بهادری نژاد [9] برحسب ماههای ایرانی (شمسی) با مقادیر نظیر آن حاصل از مدل های یک پارامتری و همچنین با مقادیر تجربی مقایسه شده اند.

جدول ۱ آنالیز خطا مربوط به مدل های تابشی برحسب $\sin \delta$ (معادله ۱۱) و H_0 (معادله ۱۲)

Month	$\bar{H}_{i,m}$	Eq. (11)		Eq. (12)	
		$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$	$\bar{H}_{i,c}$	$e(\%)$
January	12.52	13.88	10.86	13.53	8.07
February	15.83	16.35	3.28	16.72	5.62
March	18.38	20.07	9.19	20.92	13.82
April	23	24.14	4.96	24.72	7.48
May	26.83	27.24	1.53	27.05	0.82
June	28.54	28.62	0.28	27.86	-2.38
July	28.1	27.98	-0.43	27.38	-2.56
August	25.9	25.42	-1.85	25.48	-1.62
September	23.58	21.57	-8.52	22.15	-6.06
October	19.32	17.52	-9.32	17.92	-7.25
November	15.2	14.46	-4.87	14.21	-6.51
December	13.19	13.16	-0.23	12.51	-5.16
MBD		-0.00167		-0.005	
RMSE		1.100136		1.220491	

نتیجه گیری

به باور نویسندگان روش های سیستماتیک و استاندارد برای شناسایی عوامل موثر بر میزان تابش خورشیدی و مقایسه میزان تاثیر این عوامل با یکدیگر در نوشتجات فنی مربوط به مدل های تابش خورشیدی کمیاب است. هرچند معدودی از محققین اثر بعضی از عوامل از قبیل تابش بالای جو، نسبت ساعات آفتابی و ارتفاع از سطح دریا را بطور پراکنده بر میزان تابش کل بررسی نموده اند، این موضوع به دلیل اهمیت پژوهش مستقلی را می طلبد. در این مقاله یک روش آماری مبتنی بر رگرسیون خطی برای این منظور پیشنهاد و به کار گرفته شد. برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش پیشنهادی از داده های واقعی بدست آمده در سازمان هواشناسی ایران بعنوان مرجع مقایسه استفاده گردید. نتایج آنها با نتایج بدست آمده در این پژوهش و همچنین نتایج IMO مقایسه گردید.

جدول ۵ آنالیز خطا مربوط به مدل های تابشی

بر حسب $n/N, P, T_{dp,max}$

ماه	تجربی	معادله ۱۱	بهداری نژاد
فروردین	21.64	22.79	21.52
اردیبهشت	25.67	26.39	25.13
خرداد	28.14	28.39	27.47
تیر	28.60	28.38	28.56
مرداد	26.44	26.34	27.48
شهریور	24.32	22.72	24.14
مهر	20.38	18.60	19.54
آبان	16.25	15.20	15.12
آذر	13.76	13.35	12.22
دی	11.93	13.40	11.37
بهمن	14.80	15.34	14.17
اسفند	17.66	18.73	16.91
MAPE		4.74	3.78
RMSE		1.02	0.79

فهرست علائم

e	درصد خطای نسبی
f	ضریب تصحیح خارج از مرکز مدار زمین
G_{sc}	ثابت خورشیدی بالای جو ($1367W/m^2$)
H	میانگین روزانه شدت تشعشع خورشیدی دریافتی ($MJ/m^2/day$)
\bar{H}	میانگین ماهیانه مقادیر روزانه شدت تشعشع خورشیدی دریافتی ($MJ/m^2/day$)
H_0	میانگین روزانه شدت تشعشع خورشیدی بالای جو ($MJ/m^2/day$)
MAPE	درصد میانگین قدر مطلق خطا
MBD	میانگین تغییرات دو مقدار
n	میزان واقعی ساعات آفتابی

N	طول روز
n^*	شماره روز سال از اول ژانویه
P	فشار هوا برحسب میلیبار
R	ضریب همبستگی
R_h	میانگین روزانه رطوبت نسبی
$RMSE$	جذر میانگین مربعات تغییرات دو مقدار (مقادیر مدل و اندازه گیری شده)
T_G	دمای زمین برحسب درجه سانتیگراد ($^{\circ}C$)
$T_{dp,max}$	میانگین روزانه حداکثر درجه حرارت نقطه شبنم هوا ($^{\circ}C$)
T_{max}	میانگین روزانه حداکثر درجه حرارت هوا ($^{\circ}C$)
علائم یونانی	
δ	زاویه میل خورشید
ω_s	زاویه ساعت طلوع خورشیدی
ϕ	عرض جغرافیایی محل

مراجع

- Angstrom A. Solar and terrestrial radiation. Quart J Roy Meteor Soc 1924: 50-121.
- Prescott JA. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Trans Roy Soc South Austr 1940: 64-114
- Page JK. 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 UN conference on new sources of energy, 1964.
- Lof GOG, Duffie JA, Smith CO. World distribution of solar radiation. Sol Energy 1966;10:27-37.
- Rietveld MR. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. Agr Meteorol 1978;19:243-52.
- صفاری پور محمد حسن، مهربان مظفر علی، کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل های تحلیلی تابش خورشیدی با استفاده از داده های تجربی، شانزدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک اردیبهشت ۱۳۸۷ دانشگاه شهید باهنر کرمان
- صفاری پور محمد حسن، مهربان مظفر علی، مدل سازی تابش خورشیدی و مقایسه با داده های تجربی شانزدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک اردیبهشت ۱۳۸۷ دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- Samimi, J., Estimation of height-dependent solar irradiation and application to the Solar climate of Iran, Solar Energy Vol. 52, pp.401-9, 1994.
- بهداری نژاد مهدی، میرحسینی سید عباس، ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران، مجموعه مقالات سومین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، صفحه ۶۰۳، ۱۳۸۲.

- [10] Sabziparvar A. A., A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran *Renewable Energy*; 33:1002-1010, 2008.
- [11] Noorian A. M., Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces *Renewable Energy*; Volume 33, Issue 6, Pages 1406-1412, June 2008.

[12] بهادری نژاد مهدی، یعقوبی محمود، تهویه و سرمایش طبیعی در ساختمان های سنتی ایران، تالیف مرکز نشر دانشگاهی ۱۳۸۵

Archive of SID