

ارزیابی روش‌های مختلف محاسبه تابش خورشیدی برای شرایط اقلیمی ایران و ارائه بهترین روش

عبدالسلام ابراهیم پور^۱ - مهدی معرفت^۲

^۱ نویسنده مسؤل، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک گروه تبدیل انرژی

salam_ebr@yahoo.com

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، عضو هیئت علمی (دانشیار)، maerefat@modares.ac.ir

چکیده: محاسبه تابش خورشیدی رسیده به یک سطح افقی کاربردهای زیادی دارد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده میانگین روزانه تابش کل خورشیدی توسط سازمان هواشناسی کشور، روش‌های مختلف پیش‌بینی ارائه شده برای محاسبه تابش کل، مقایسه شده و مناسب‌ترین روش پیش‌بینی که به نتایج اندازه‌گیری شده برای شهرهای ایران نزدیکتر باشد، ارائه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که روش ارائه شده توسط واتانابه برای اقلیم‌های ژاپن به شرطی که ضریب صافی هوا به صورت صحیح برآورد شود، برای شهرهای مختلف ایران نیز نتایج خوبی می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تابش کل خورشیدی، ضریب صافی هوا، سطح افقی

۱- مقدمه

پیموده شده اشعه در جو و همچنین ترکیبات جو (ابرها، گرد و غبار، رطوبت و مه) در آن مسیر بستگی دارد. این ابرها و ذرات موجود در جو زمین نور خورشید را به جهان مختلف نیز پراکنده می‌کنند. به طور کلی تابشی که به یک سطح می‌رسد، کلاً از سه جزء تشکیل می‌شود: تابش مستقیم، تابش پخششی و تابش بازتابی ناشی از سطوح مجاور. سطوح معمول مانند چمن، درختان و سنگ‌ها حدود ۲۰ درصد تابش دریافتی را منعکس کرده و بقیه را جذب می‌کند. سطح پوشیده شده از برف حدود ۷۰ درصد انرژی خورشیدی را منعکس می‌کند [۲۱].

تابش خورشیدی کل رسیده به یک سطح کاربردهای زیادی در محاسبات مربوط به مصرف انرژی دارد، بنابراین برآورد دقیق آن دارای اهمیت زیادی می‌باشد. توزیع طیفی تابش خورشیدی در خارج از جو مشابه با انرژی صادره از جسم سیاهی به دمای ۵۷۸۲ درجه سلسیوس است که تقریباً نصف تابش خورشیدی که وارد جو زمین می‌شود به واسطه جذب توسط مواد موجود در جو زمین و انعکاس توسط ابرها به سطح زمین می‌رسد و در نتیجه تابش خورشیدی که به سطح زمین برخورد می‌کند کمتر از مقدار آن در خارج از اتمسفر زمین است. مقدار کاهش تابش خورشیدی به طول مسیر

روش‌های مختلفی توسط محققین برای تخمین میزان شدت تابش خورشید در یک نقطه سطح زمین برای نقاط مختلف جهان پیشنهاد شده است. هر یک از این روش‌ها بر اساس ضریب صافی هوا، کسر ساعات آفتابی، میزان بارندگی‌ها، دما، رطوبت نسبی، فشار، ارتفاع از سطح دریا و پارامترهای دیگر می‌باشند که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌گردد.

صباغ^۱ [۳] یک رابطه برای برآورد کل تابش خورشید رسیده به یک سطح افقی برای نقاط مختلف جهان ارائه نمود که این رابطه وابسته به داده‌های اقلیمی مانند درصد رطوبت و دمای ماکزیمم و همچنین داده‌های مانند عرض جغرافیایی و شماره روز از سال است.

پالبریج^۲ [۴] نیز با استفاده از فاکتور میزان ابری بودن هوا و همچنین زاویه سمت دو رابطه را برای برآورد تابش‌های مستقیم و دیفیوز رسیده به یک سطح افقی ارائه نمود.

زانگ^۳ [۵] یک رابطه برای برآورد تابش به صورت ساعتی بر روی سطح افقی ارائه نمود که رابطه بر اساس زاویه ساعت و ضریب ابر، دمای هوای خشک و سرعت باد بوده و همچنین رابطه دارای تعدادی ضریب ثابت است که باید از داده‌های اندازه‌گیری و رگرسیون بدست آیند. برای استفاده از این معادله برای اقلیم‌های دیگر باید مقادیر ضرایب ثابت را بدست آورد.

علی محمد^۴ [۶] یک فرمول جدید بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده از روش رگرسیون برای برآورد میزان تابش خورشیدی استخراج کرد که فرمول بدست آمده وابسته به کسر ساعات آفتابی است.

صباحی^۵ [۷] نیز یک رابطه برای تابش میانگین کل ماهیانه بر اساس کسر ساعات آفتابی ارائه نموده است که ضرایب آن از داده‌های اندازه‌گیری شده بدست آمده است.

لوئیس^۶ [۸] با استفاده از داده‌های چندین ساله اندازه‌گیری شده یک رابطه را برای برآورد میانگین ماهیانه تابش از داده‌های روزانه میانگین دمای خشک روزانه، رطوبت نسبی، کسر ساعات آفتابی، زاویه انحراف زمین و پارامترهای دیگری با استفاده از رگرسیون بدست آورده است.

برای تخمین میزان شدت تابش خورشید برای شهرهای ایران نیز تحقیقات متعددی صورت گرفته که از آن میان می‌توان به تحقیقات دانشیار [۹]، سبزی‌پرور [۱۰]، بهادری نژاد [۱۱] و یعقوبی [۱۲] اشاره نمود.

دانشیار روش ارائه شده توسط پالبریج برای محاسبه میزان شدت تابش رسیده به یک سطح افقی را برای شهرهای مختلف ایران با تغییر ضرایب ثابت اصلاح نمودند.

سبزی‌پرور روش‌های مختلف (صباغ، پالبریج و دانشیار) را برای محاسبه تابش کل روزانه رسیده به یک سطح افقی را برای مناطق ساحلی ایران بررسی و اصلاح نمود و برای اصلاح این روابط از ضریب فاصله زمین و خورشید که در طول سال متغیر می‌باشد، استفاده نمود.

بهادری نژاد ضریب صافی متوسط ماهیانه هوا را بر اساس پارامترهای اقلیمی رطوبت نسبی، دما، میزان بارندگی و میزان ساعات آفتابی برای شهرهای مختلف ایران ارائه نمود. ضریب صافی هوا پارامتر مهمی در محاسبه صحیح میزان تابش خورشیدی می‌باشد.

یعقوبی و سبزواری نیز با استفاده از برآورد صحیح کسر ساعات آفتابی از داده‌های اندازه‌گیری شده میزان ضریب صافی هوا را به صورت ماهیانه برای شهر شیراز برآورد کردند.

با توجه به اینکه اکثر روش‌های ارائه شده در این زمینه برای اقلیم‌ها و شرایط خاصی مقدار تابش خورشیدی را صحیح پیش‌بینی می‌کنند و یا بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در آن منطقه بدست آمده‌اند، تعیین و ارائه بهترین روش

¹ Sabbagh

² Paltridge

³ Zhang Qingyuan

⁴ Ali Al-Mohamad

⁵ A. A. El-Sebaei

⁶ Louis E. Akpabio

۲-۲- زاویه ساعت و معادله زمان

زاویه ساعت ω زاویه بین عرض جغرافیای موضعی و عرض جغرافیایی که اشعه‌های خورشید در سمت‌الراس آن قرار دارند، است یعنی زاویه‌ای است که زمین باید برای انطباق نصف‌النهار آن نقطه روی اشعه‌های خورشید بچرخد. برای محاسبه زاویه ساعت باید معادله زمان E_t ابتدا حساب گردد.

$$E_t = 229.18 \begin{pmatrix} 0.000075 + 0.001868 \cos B \\ -0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B \\ -0.040849 \sin 2B \end{pmatrix} \quad (۳)$$

برای محاسبه زاویه ساعت باید اختلاف ساعت Time Zone (Tz) نیز در منطقه مورد نظر مشخص گردد که مقدار آن را می‌توان به صورت زیر تقریب زد.

$$Tz = (L + 7.5) / 15 \quad (۴)$$

که در این رابطه L طول جغرافیای و بر حسب درجه است. زاویه ساعت بر حسب درجه از رابطه زیر برای هر ساعت از سال حساب می‌گردد.

$$\omega = 15 \left(h - 12.5 + \frac{E_t}{60} + \frac{L}{15} - Tz \right) \quad (۵)$$

که در این رابطه L طول جغرافیای (درجه)، h ساعت مورد نظر، E_t معادله زمان و Tz اختلاف ساعت است.

۲-۳- محاسبه زاویه سمت θ_z

زاویه سمت، زاویه بین اشعه‌های خورشید و قائم بر سطح افقی می‌باشد (شکل ۱) و از روی مثلثات (بر حسب درجه) کروی داریم:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \alpha_s \quad (۶)$$

که در آن ϕ عرض جغرافیای و α_s زاویه فراز (Altitude) است.

۳- محاسبه تابش خورشیدی رسیده بر روی سطوح افقی در خارج از اتمسفر

برای پیش‌بینی صحیح میزان تابش خورشیدی برای اقلیم‌های مختلف ایران ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این تحقیق مقایسه روش‌های مختلف برآورد تابش کل برای شهرهای ایران و ارائه بهترین روش پیش‌بینی آن می‌باشد. برای انجام این کار، ابتدا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده تابش خورشید رسیده به یک سطح افقی به صورت میانگین روزانه در سطح زمین که توسط سازمان هواشناسی کشور [۱۳] انجام شده است، ضریب صافی هوا به صورت ماهیانه بدست آمده، و با استفاده از روش دوفیه [۱۴] برای شهرهای تبریز، اصفهان، بندرعباس، تهران، شیراز، کرمان، بوشهر، همدان و یزد به صورت ساعتی مقدار ضریب صافی هوا تخمین زده می‌شود. سپس از روش‌های مختلف تابش کل پیش‌بینی شده و نتایج حاصله با داده‌های اندازه‌گیری شده میانگین روزانه، مقایسه می‌گردد. از این مقایسه امکان تعیین بهترین روش برای پیش‌بینی تابش کل فراهم می‌گردد.

۲- پارامترها و زاویه‌های خورشیدی

برای محاسبه مقدار تابش خورشیدی رسیده به یک سطح احتیاج به تعریف تعدادی پارامتر و زاویه‌های خورشیدی داریم [۱۵ و ۱۶] که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

۲-۱- زاویه انحراف δ

زاویه بین اشعه‌های خورشید و صفحه استوایی است که از ۲۳/۴۵ درجه در تابستان تا ۲۳/۴۵- در زمستان تغییر می‌کند و از روش زیر بر حسب درجه محاسبه می‌گردد:

$$\delta = \frac{180}{\pi} \begin{pmatrix} 0.006918 - 0.399912 \cos B + \\ + 0.070257 \sin B - 0.006758 \cos 2B \\ + 0.000907 \sin 2B - \\ - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B \end{pmatrix} \quad (۱)$$

که در این رابطه n شماره روزها از اول ژانویه است و داریم:

$$B = 6.283185 \frac{n-1}{365} \quad (۲)$$

زاویه انحراف δ در نقطه اعتدالین پاییز و بهار صفر و در تحویل تابستانی در ۲۱ ژوئن ۲۳/۵+ درجه و در تحویل زمستانی در نیمکره شمالی ۲۳/۵- درجه می‌باشد.

۳-۱- میزان کل تابش رسیده در جهت نرمال سطح در

خارج از اتمسفر G_{en}

برای محاسبه میزان تابش رسیده در جهت نرمال سطح به صورت روزانه از رابطه زیر استفاده شده است (W/m^2) :

$$G_{en} = G_{sc} \left(\begin{array}{l} 1.000110 + 0.034221 \cos B + \\ + 0.001280 \sin B + 0.000719 \cos 2B + \\ + 0.000077 \sin 2B \end{array} \right) \quad (7)$$

که در این رابطه $G_{sc} = 1367 W/m^2$ ثابت خورشیدی، n شماره روزها از اول ژانویه است و داریم:

$$B = 6.283185 \frac{n-1}{365} \quad (8)$$

۳-۲- میزان کل تابش رسیده در خارج از اتمسفر بر روی

یک صفحه افقی G_{eh}

برای محاسبه این مقدار با داشتن زاویه سمت θ_z داریم:

$$G_{eh} = G_{en} \cos \theta_z \quad (9)$$

که در این رابطه زاویه سمت بر حسب رادیان است و برای تعیین میزان کل تابش روزانه باید از این رابطه در طول روز (بین طلوع و غروب آفتاب) انتگرال گرفت.

۴- میزان کل تابش G_{th} در سطح زمین و ضریب صافی

هوا

ضریب صافی هوا در یک نقطه با طول و عرض جغرافیای معین عبارتست از نسبت انرژی تابشی دریافت شده توسط یک صفحه افقی در دوره زمانی مورد نظر به مقدار انرژی تابشی دریافتی همین صفحه افقی در همان زمان اگر در خارج از جو زمین قرار داشته باشد. بنابراین ضریب صافی هوا را می توان برای هر روز، ساعت و یا ماه در نظر گرفت، مثلاً ضریب صافی هوای ساعتی K_{th} عبارت است از:

$$K_{th} = \frac{G_{th}}{G_{eh}} \quad (10)$$

که در این رابطه G_{th} کل تابش رسیده در یک ساعت به یک سطح افقی در نقطه ای معین روی سطح زمین است و G_{eh} میزان تابش خارج از اتمسفر رسیده در یک ساعت بر روی

همان صفحه افقی است. به همین ترتیب اگر شدت تابش ها به صورت متوسط روزانه یا ماهیانه باشند، مقادیر روزانه K_{td} و ماهیانه K_{tm} حساب می گردند.

اگر میزان تابش رسیده به یک سطح افقی در سطح زمین به درستی محاسبه گردد، می توان گفت که ضریب صافی هوا نیز درست محاسبه شده است. در این تحقیق با استفاده از داده های اندازه گیری شده تابش کل G_{th} توسط سازمان هواشناسی کشور که به صورت متوسط روزانه هستند، می توان میزان متوسط ماهیانه و روزانه ضریب صافی هوا را حساب نمود و سپس از روش دوفیه مقدار ضریب صافی هوا را به صورت ساعتی محاسبه نمود.

دوفیه^۷ در سال ۱۹۸۰، رابطه زیر را برای محاسبه میزان ساعتی ضریب صافی از روی میزان ماهیانه آن ارائه نمود [۱۵].

$$K_{th} = \left[a + b \cos \frac{\pi}{12} (h-12) \right] \bar{K}_{tm} \quad (11)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

که در این رابطه h زمان بر حسب ساعت بوده و ω_s زاویه ساعت برای طلوع یا غروب خورشید است. در این روابط $(\omega_s - 60)$ باید به رادیان تبدیل گردد.

۵- روش های مختلف پیش بینی تابش کل G_{th}

در این قسمت روش های مختلفی که برای پیش بینی میزان تابش کل رسیده به سطح افقی در سطح زمین ارائه شده و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، بررسی می گردد. روش اول: روش واتانابه^۸

در این روش که توسط واتانابه پیشنهاد شده است، میزان تابش دیفیوز، مستقیم و کل برای اقلیم های ژاپن از روابط زیر بر حسب W/m^2 حساب شده است [۱۸].

⁷ Duffie
⁸ Watanabe

$$r_g = \frac{\pi}{T} (a' + b' \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (17)$$

که در آن T طول شبانه‌روز و 24 ساعت است، ω زاویه ساعت بر حسب رادیان و ω_s زاویه ساعتی خورشید هنگام غروب (بر حسب رادیان) است و ضرایب a' ، b' ضرایب تجربی هستند که از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$a' = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 1.047)$$

$$b' = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 1.047)$$

در این روش چون داده‌های واقعی تابش کل اندازه‌گیری شده میانگین روزانه موجود می‌باشند، مقدار ساعتی آن از این روش قابل محاسبه است.

روش پنجم: روش انجمن مهندسان و تهویه مطبوع امریکا (Ashrae)

در این روش ابتدا باید میزان تشعشع مستقیم خورشیدی رسیده به سطح در جهت نرمال G_{bn} محاسبه گردد، داریم:

$$G_{bn} = \frac{A}{\exp(B/\sin \alpha_s)} \quad (18)$$

که در آن A تابش ظاهری خورشیدی، B ضریب خاموشی اتمسفر و بی‌بعد است و α_s زاویه فراخ خورشیدی می‌باشد که مقادیر A و B به صورت ماهیانه از دو رابطه زیر بدست می‌آیند و برای در نظر گرفتن اثر ابری هوا از ضریب ابر F_c (به صورت ماهیانه) استفاده شده است. [17]

$$A = 1140 + 74 \cos(F_c N)$$

$$B = 0.132 + 0.023 \cos(F_c N)$$

$$F_c = 1 - \frac{N(\text{cloudy day})}{N(\text{clear day})}$$

که در این روابط N شماره روز در سال است. بنابراین مقدار تابش مستقیم روی یک صفحه افقی در سطح زمین از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$G_{bh} = G_{bn} \cos \theta_z \quad (19)$$

همچنین مقدار تابش دیفیوز نیز از رابطه زیر حساب می‌گردد.

$$G_{dh} = C G_{bn} \quad (20)$$

$$K_{TC} = 0.4268 + 0.1934 \sin \alpha_s$$

$$K_{DS} = K_{th} - (1.107 + 0.03569 \sin \alpha_s + 1.681 \sin^2 \alpha_s)(1 - K_{th})^2 \quad \text{if } K_{th} \geq K_{TC}$$

$$K_{DS} = (3.996 - 3.862 \sin \alpha_s + 1.54 \sin^2 \alpha_s) K_{th}^3 \quad \text{if } K_{th} < K_{TC} \quad (22)$$

$$G_{dh} = G_{en} \frac{K_{th} - K_{DS}}{1 - K_{DS}} \sin \alpha_s$$

$$G_{bh} = G_{en} K_{DS} \frac{1 - K_{th}}{1 - K_{DS}} \sin \alpha_s \quad (23)$$

$$G_h = G_{bh} + G_{dh}$$

که در این روابط G_{dh} تابش دیفیوز، G_{bh} تابش مستقیم، K_{th} ضریب صافی هوا به صورت ساعتی و α_s زاویه فراخ بر حسب رادیان است.

روش دوم: روش پالبریج⁹

در این روش تابش دیفیوز و مستقیم بر حسب $\text{Cal}/\text{Cm}^2 \cdot \text{h}$ بر روی یک سطح افقی به صورت زیر حساب می‌شود.

$$G_{dh} = 0.218 + 0.299(90 - \theta_z) + 17.27 F_c \quad (24)$$

$$G_{bh} = 81.738 [1 - \exp(-0.075(90 - \theta_z))] \quad (25)$$

که در این رابطه θ_z بر حسب درجه و F_c نیز ضریب ابر است. [4]

روش سوم: روش دانشیار

دانشیار با استفاده از مدل پالبریج معادله زیر را برای محاسبه تابش دیفیوز ارائه نمود. [9]

$$G_{dh} = 0.123 + 0.181(90 - \theta_z) + 10.43 F_c \quad (26)$$

میزان تابش مستقیم در این روش از همان رابطه 15 محاسبه می‌گردد.

روش چهارم: روش کولارس¹⁰

کولارس و همکاران [16] رابطه رگرسیونی برای نسبت تابش کل لحظه‌ای به تابش کل روزانه r_g به صورت زیر برای یک صفحه افقی ارائه نمودند.

⁹ Paltridge
¹⁰ Collares

که ضریب C نیز به صورت ماهیانه بر اساس ضریب ابر F_c از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C = 0.047 + 0.03 \cos(F_c N)$$

۶- روش انجام تحقیق

ابتدا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده شدت تابش خورشید رسیده به یک سطح افقی (به صورت میانگین روزانه) در سطح زمین توسط سازمان هواشناسی کشور، ضریب صافی هوا به صورت ماهیانه بدست آمده و سپس با استفاده از روش دوفیه برای شهرهای تبریز، اصفهان، بندرعباس، تهران، شیراز، کرمان، بوشهر، همدان و یزد به صورت ساعتی مقدار ضریب صافی هوا از رابطه ۱۱ تخمین زده می‌شود. سپس، از روش‌های مختلف ارائه شده برای پیش‌بینی شدت تابش خورشیدی، مقدار آن تخمین زده شده و با نتایج اندازه‌گیری شده توسط سازمان هواشناسی کشور برای شهرهای مورد نظر مقایسه می‌گردد و بهترین روش برای پیش‌بینی تابش کل ارائه می‌گردد.

۷- نتایج

نتایج با استفاده از میانگین خطای اریبی MBE و جذرمیانگین مربعات خطا RMSE و درصد متوسط خطا MPE برای شهرهای مورد نظر در جدول‌های ۲، ۱ و ۳ بین داده‌های تابش کل اندازه‌گیری شده روزانه و ماهیانه با نتایج حاصل از مدل‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۱ نتایج RMSE روزانه را از روش‌های مختلف نشان داده است و دیده می‌شود که روش‌های کولارس و واتانابه نتایج بهتری را داده‌اند. در جدول ۲ نیز نتایج RMSE, MBE, MPE ماهیانه برای روش واتانابه را نشان می‌دهد و دیده می‌شود که این روش برای تمام شهرها نتایج خوبی می‌دهد. همچنین در جدول ۳ نتایج روش واتانابه و کولارس به این صورت مقایسه شده که ابتدا از مدل کولارس

مقدار تابش کل G_H به صورت ساعتی محاسبه و سپس از رابطه ۱۰ میزان ضریب صافی هوا بدست آمده و از این ضریب صافی در معادلات روش واتانابه استفاده شده است و دیده می‌شود که نتایج برابر بدست آمده است.

همچنین شکل‌های ۲ تا ۶ نتایج محاسبه تابش خورشیدی کل از روش‌های مختلف و برای چند شهر انتخاب شده را نشان می‌دهند.

۸- جمع‌بندی

در این تحقیق میزان تابش خورشیدی کل از روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج این روش‌ها با داده‌های ماهیانه و روزانه اندازه‌گیری شده توسط سازمان هواشناسی کشور برای شهرهای مختلف ایران مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج داریم:

ا- در صورت موجود بودن داده‌های اندازه‌گیری شده روزانه تابش کل می‌توان مقدار ساعتی آن را از روش کولارس با دقت زیادی حساب نمود.
ب- اگر داده‌های اندازه‌گیری شده روزانه در دسترس نباشند، می‌توان از روش دوفیه با داشتن میزان ضریب صافی ماهیانه، مقدار ساعتی آن را از رابطه ۱۱ محاسبه کرده و سپس از روش واتانابه و یا رابطه ۱۰ مقدار تابش کل را به صورت ساعتی برآورد نمود.

ت- دیده می‌شود که اگر با نتایج تابش کل بدست آمده از روش کولارس و همچنین از رابطه ۱۰ میزان ضریب صافی هوا محاسبه و سپس از روش واتانابه مقدار تابش کل برآورد گردد نتایج آن با نتایج روش کولارس یکی می‌باشد.

ث- از آنجایی که در روش‌های پالبریج و دانشیار فرض شده که آسمان صاف و بدون ابر است، نتایج با اختلاف زیاد و بیشتر از داده‌های واقعی بدست آمده است.

علائم یونانی

δ : زاویه انحراف

ϕ : عرض جغرافیای

ω : زاویه ساعت

θ_z : زاویه سمت

α_s : زاویه فراز

۱۰- مراجع

[۱] ساسان مرادی، کتاب تنظیم شرایط محیطی، تهران چاپ آشیان ۱۳۸۴، صفحه ۷۹-۱۰۴

[۲] Yunus A. Cengel، کتاب گرمایش و سرمایش رویکردی نو، ترجمه کوروش امیر اصلانی، شرکت تولیدی و صنعتی انرژی کشور، آبان ۱۳۸۴، صفحه ۳۶-۳۹ و ۸۱-۱۱۴

[3] J. A. Sabbagh, A. A. M. Sayigh, and E. M. A. Al-Salam, "Estimation of the total solar radiation from meteorological data", *Solar Energy*, Vol. 19, No. 3, PP. 307-311. (1977)

[4] G.W. Paltridge, D. Proctor, "Monthly mean solar radiation statistics for Australia", *Solar Energy*, Vol. 18, No. 3, PP. 235-243. (1976)

[5] Z. Qingyuan, J. Huang, L. Siwei, "Development of Chinese weather data for building energy calculations", *Proc. 4th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings*. PP. 1211, October 2-5, Changsha, Hunan, China. (2001)

[6] A. Al-Mohamad, "global, direct and diffuse solar radiation in syria", *Applied energy*, Vol. 79, PP. 191-200. (2004)

[7] A. A. El-Sebaai, A. A. Trabea, "Estimation of Global Solar Radiation on Horizontal Surfaces Over Egypt", *Egypt. J. Solids*, Vol. 28, No. 1. (2005)

[8] L. E. Akpabio, S. O. Udo, S. E. Etuk, "Empirical Correlations of Global Solar Radiation with Meteorological data for Onne, Nigeria", *Turk J Phys*, Vol 28, PP. 205 - 212. (2004)

ج- در روش Ashrae نیز چون ضرایب A,B,C به صورت صحیح برآورد نشده و از داده‌های اندازه‌گیری شده برای یک اقلیم خاص بدست آمده‌اند، نتیجه خوبی برای پیش‌بینی میزان تابش خورشیدی ارائه نمی‌دهد.

ح- با توجه به اینکه داده‌های اندازه‌گیری شده ساعتی تابش کل موجود نمی‌باشند، بنابراین نمی‌توان گفت که کدام روش میزان تابش خورشیدی کل را به صورت ساعتی بهتر پیش‌بینی می‌نماید و تمام مقایسه‌ها در این تحقیق بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده روزانه و ماهیانه میانگین تابش کل بوده است.

۹- نمادها و نشانه‌ها

n : شماره روزها از اول ژانویه و $B = 6.283185 \frac{n-1}{365}$

Tz : اختلاف ساعت

h : ساعت

G_{sc} : ثابت خورشیدی

E_t : معادله زمان

L : طول جغرافیای

K_{th} : ضریب صافی هوا

G_{en} : تابش رسیده در جهت نرمال سطح در خارج از اتمسفر

G_{eh} : تابش رسیده در خارج از اتمسفر بر روی یک صفحه افقی

G_h : تابش رسیده بر روی یک صفحه افقی در سطح زمین

G_{bh} : تابش مستقیم رسیده بر روی یک صفحه افقی در سطح زمین

سطح زمین

G_{dh} : تابش دیفیوز رسیده بر روی یک صفحه افقی در سطح زمین

[14] J.A. Duffie and Beckman, W.A., "Solar energy of thermal processes", *John Wiley*, New York. (1980)

[15] Dr. E. Maxwell, "A Quasi-Physical Model for Converting Hourly Global Insolation to Direct Normal Insolation", *Solar Energy Research Institute* (National Renewable Energy Laboratory) NREL TR/215-3087. (1987)

[16] M. Collares-Perreira, A. Rabl, "The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values", *Solar Energy*, Vol 22, PP. 155-164. (1979)

[17] *ASHRAE*, Handbook, heating, ventilating, and air-conditioning applications. (1995)

[18] T. Watanabe, "Procedures for Separating Direct and Diffuse Insolation on a Horizontal Surface and Prediction of Insolation on Tilted Surfaces", *Transactions*, No. 330, Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan. (1983)

[9] M. Daneshyar, "Solar Radiation Statistics for Iran", *Solar Energy*, Vol. 21, PP. 345-349. (1978)

[10] A. Sabziparvar, "General Formula for Estimation of Monthly Mean Global Solar Radiation in Different Climates on the South and North Coasts of Iran", *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy*. (2007)

[۱۱] مهدی بهادری نژاد، سید عباس میر حسینی، ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران، سومین همایش بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، ۱۳۸۴

[12] M. A. Yaghoubi and A. Sabzevari, "Further data on solar radiation in Shiraz, Iran", *Renewable Energy*, Vol. 7, Issue. 4, PP. 393-399. (1996)

[13] IRIMO. *Islamic Republic of Iran Meteorological Office, Data Center, Tehran*, Iran, <http://www.weather.ir/>

جدول ۱- نتایج RMSE روزانه از روش های مختلف

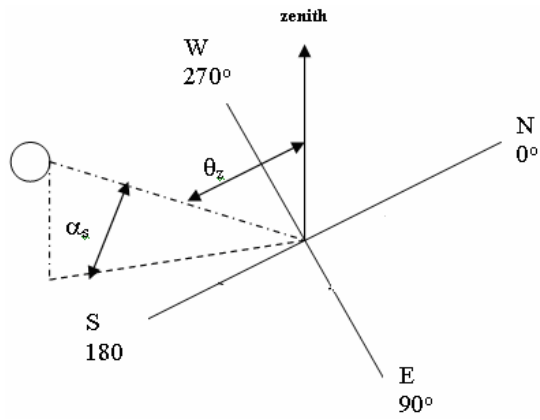
روشن/شهر	کولارس	بالبرج	دانشیار	Ashrae	واتانابه
تبریز	0.92	322.00	281.19	90.37	19.56
اصفهان	1.42	300.69	255.86	73.89	29.18
بندرعباس	1.54	297.65	250.81	68.27	19.65

جدول ۲- نتایج RMSE, MBE, MPE ماهیانه از روش واتانابه

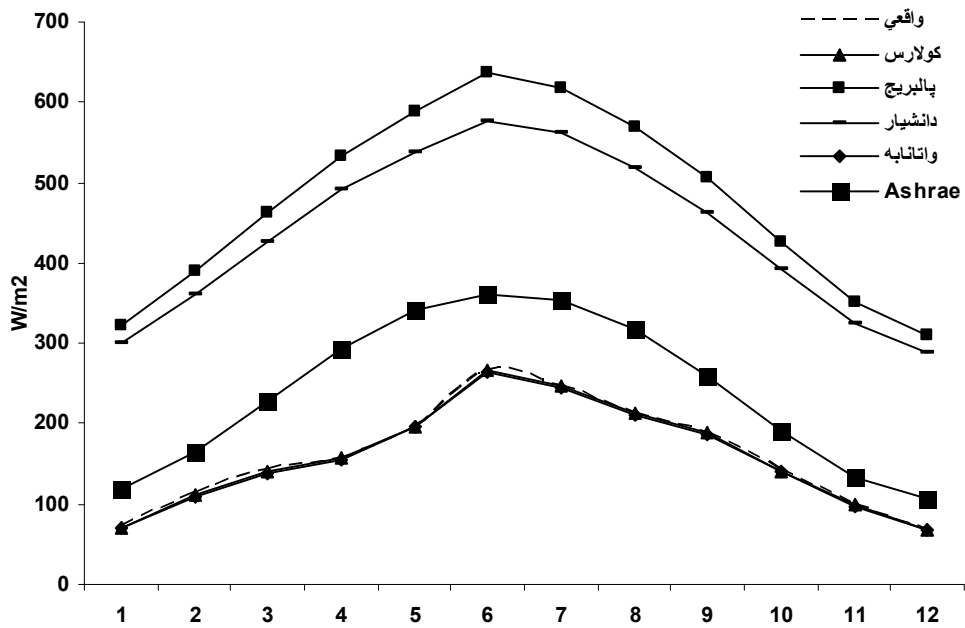
شهر	MBE	RMSE	MPE %
تهران	-3.88	4.01	1.74
شیراز	-3.95	4.04	1.82
کرمان	-3.97	4.05	1.81
دوشهر	-3.77	3.86	1.83
همدان	-3.24	3.34	1.75
یزد	-3.86	3.98	1.78
تبریز	-2.37	2.47	1.71
اصفهان	-3.33	3.44	1.77
بندرعباس	-3.80	3.88	1.85

جدول ۳- نتایج RMSE روزانه از روش واتانابه با ضریب صافی محاسبه شده از کولارس

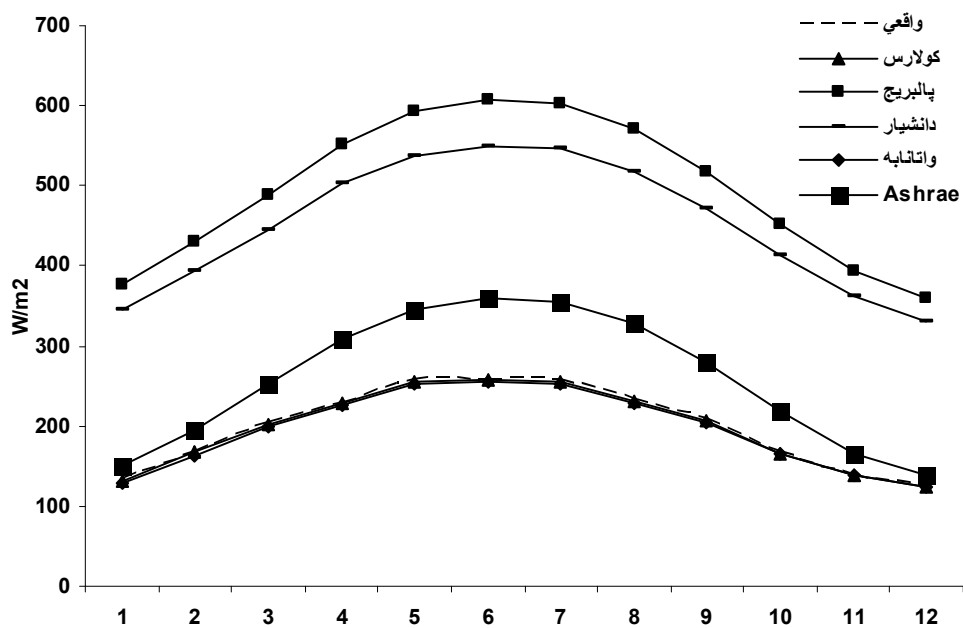
روشن/شهر	کولارس	واتانابه
تبریز	0.92	0.92
اصفهان	1.42	1.42
بندرعباس	1.54	1.54



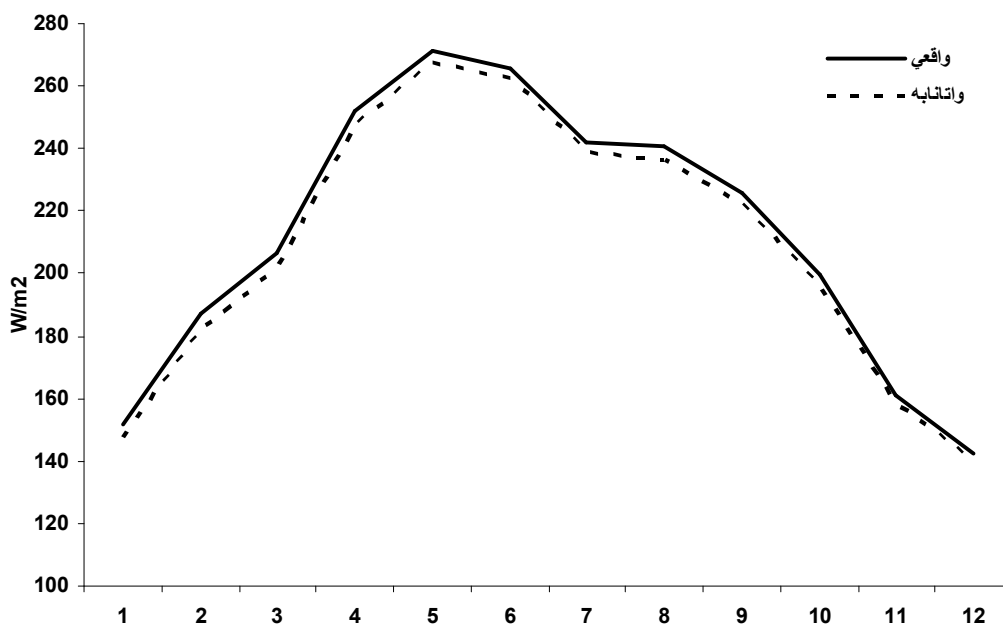
شکل ۱- زوایای خورشیدی



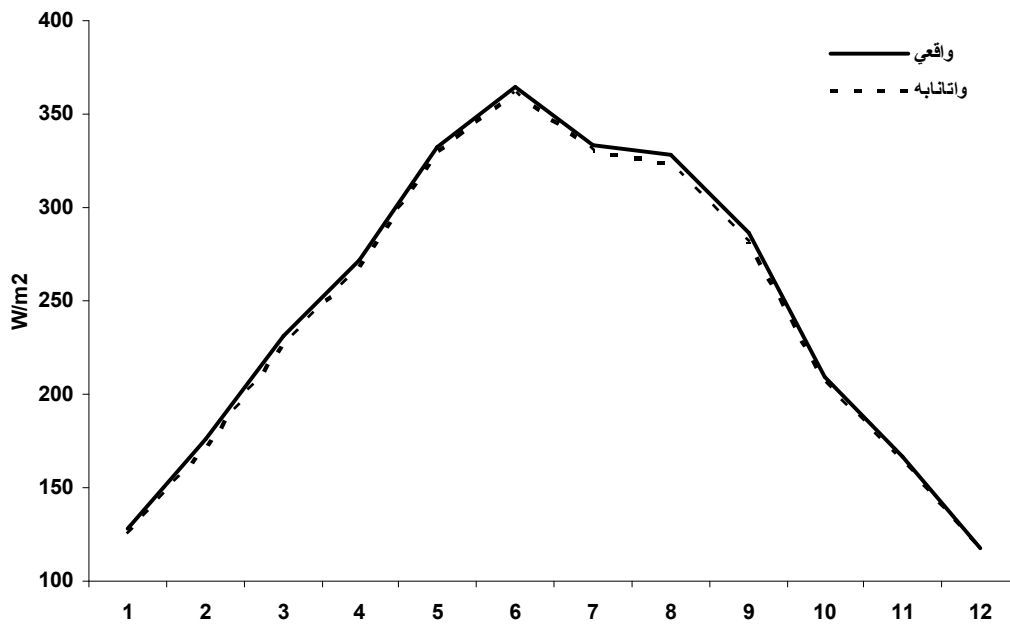
شکل ۲- نتایج تابش خورشیدی کل به صورت ماهیانه از روش های مختلف (تبریز)



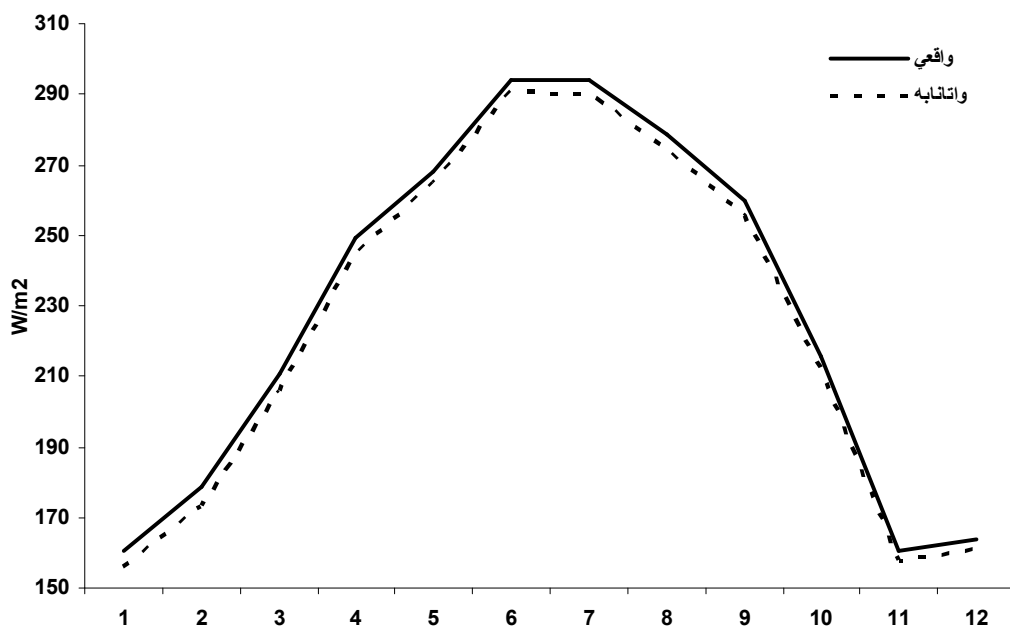
شکل ۳- نتایج تابش خورشیدی کل به صورت ماهیانه از روش های مختلف (اصفهان)



شکل ۴- مقایسه تابش خورشیدی کل به صورت ماهیانه بدست آمده از روش واتانابه با داده های واقعی (بندرعباس)



شکل ۵- مقایسه تابش خورشیدی کل به صورت ماهیانه بدست آمده از روش واتانابه با داده‌های واقعی (تهران)



شکل ۶- مقایسه تابش خورشیدی کل به صورت ماهیانه بدست آمده از روش واتانابه با داده‌های واقعی (شیراز)

Comparative study of various methods to estimate the global solar radiation in Iran climates

Abdulsalam Ebrahimpour¹, Mehdi Maerefat²

¹Department of Mechanic- Islamic azad University- Science & Research branch -Tehran- Iran - P.O.Box: 14515-775

²Department of Mechanic- Tarbiat Modares University -Tehran – Iran- P.O.Box:14115-111

Abstract

Global solar radiation is important factor in the building energy simulations. The daily average global solar radiation has been measured by IRIMO¹¹, which used to compare several methods of predicting the global solar radiation and the best method was obtained for Iran cities. Results show that, if the exact clearness index can be calculated, the proposed method by Watanabe will be the best.

¹¹ *Islamic Republic of Iran Meteorological Office*