



عبدالسلام ابراهیم پور<sup>۱</sup>  
مهدی معرفت<sup>۲</sup>  
هادی نبیری<sup>۳</sup>

## ارائه یک رابطه جدید برای تخمین میزان تابش کل در اقلیم‌های مختلف ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۵/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۷/۱۰/۲۸

### چکیده

محاسبه تابش خورشیدی رسیده به یک سطح افقی کاربردهای زیادی در محاسبات مصرف انرژی دارد. روش‌های زیادی برای پیش‌بینی تابش خورشیدی رسیده به یک سطح افقی در سطح زمین ارائه شده که این روش‌ها برای اقلیم‌ها و شرایط خاص مقدار تابش خورشیدی را صحیح پیش‌بینی می‌کنند و یا بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در آن منطقه به دست

---

۱ - عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

E-mail: salam\_ebr@yahoo.com

۲ - دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس.

E-mail: Maerefat@modares.ac.ir

۳ - دانشجوی دوره دکتری جغرافیای طبیعی دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.

E-mail: h\_nayeri@tabrizu.ac.ir

آمده‌اند. بنابراین ارائه روش مناسب برای پیش‌بینی صحیح میزان تابش خورشیدی برای اقلیم‌های مختلف ایران ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده میانگین ماهانه و روزانه تابش کل خورشیدی<sup>۱</sup> توسط سازمان هواشناسی کشور برای یک دوره ۱۴ ساله (۱۹۹۲-۲۰۰۵)، روش جدیدی برای برآورد میزان تابش کل خورشیدی رسیده به یک سطح افقی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که رابطه جدید ارائه شده و همچنین روش واتانابه به شرطی که ضریب صافی هوا به صورت صحیح برآورد شود، برای شهرهای مختلف ایران نتایج خوبی به دست می‌دهد.

### کلید واژه ها

تابش کل خورشیدی، ضریب صافی هوا، سطح افقی، اقلیم ایران.

### مقدمه

برآورد دقیق تابش خورشیدی کل رسیده به یک سطح کاربردهای زیادی در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای محاسبات مربوط به میزان مصرف انرژی دارد. از مقدار تابش خورشیدی که وارد جو می‌شود، در اثر جذب توسط مواد موجود در آن و انعکاس توسط ابرها کاسته شده و در نتیجه تابش خورشیدی که به سطح زمین برخورد می‌کند کمتر از مقدار آن در خارج از جو است. مقدار کاهش تابش خورشیدی به طول مسیر پیموده شده اشعه و همچنین ترکیبات آن (ابرها، گرد و غبار، رطوبت و مه) بستگی دارد. ابرها و ذرات موجود در جو نور خورشید را به جهات مختلف نیز پراکنده می‌کنند (مرادی، ۱۳۸۴).

روش‌های مختلفی توسط محققان 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 بارندگی، دما، رطوبت نسبی، فشار، ارتفاع از سطح دریا و

پارامترهای دیگر می‌باشند که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌گردد. صباغ و همکاران (۱۹۷۶) رابطه‌ای برای برآورد کل تابش خورشیده رسیده به یک سطح افقی برای نقاط مختلف جهان ارائه نمودند که به داده‌های اقلیمی مانند درصد رطوبت و دمای ماگزیمم و همچنین عرض جغرافیایی و شماره روز از سال وابسته است. پالبریج (۱۹۷۷) نیز با استفاده از فاکتور میزان ابری بودن هوا و همچنین زاویه زنیت دو رابطه را برای برآورد تابش های مستقیم و پراکنده<sup>۱</sup> رسیده به یک سطح افقی ارائه نمود. هنگ و همکاران (۲۰۰۱) رابطه‌ای برای برآورد تابش به صورت ساعتی بر روی سطح افقی ارائه نمودند که بر اساس زاویه ساعت<sup>۲</sup> و ضریب ابر، دمای هوای خشک و سرعت باد استوار بوده و شامل تعدادی ضرایب ثابت است که باید از روی داده‌های اندازه‌گیری شده و روش رگرسیون به دست آیند. برای استفاده از رابطه مذکور برای سایر شرایط اقلیمی باید مقادیر ضرایب ثابت را به دست آورد. صباغی (۲۰۰۵) نیز رابطه‌ای برای تابش میانگین کل ماهانه بر اساس کسر ساعات آفتابی ارائه نموده است که ضرایب آن از داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل شده است.

به منظور تخمین میزان شدت تابش خورشید برای شهرهای ایران نیز روش‌ها و مقادیری پیشنهاد شده است. دانشیار (۱۹۷۸) 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 نمود. سبزی‌پرور (۲۰۰۷) روش‌های مختلف (صباغ، پالبریج و دانشیار)، برای محاسبه تابش کل روزانه رسیده به یک سطح افقی را در مورد مناطق ساحلی ایران بررسی و اصلاح نمود و بدین منظور از ضریب فاصله زمین و خورشید که در طول سال متغیر می‌باشد، استفاده کرد. بهادری‌نژاد (۱۳۸۴) ضریب صافی متوسط ماهانه هوا را بر اساس رطوبت نسبی، دما، میزان بارندگی و میزان ساعات آفتابی برای شهرهای مختلف ایران ارائه کرد و نشان داد که ضریب صافی هوا پارامتر مهمی در محاسبه میزان تابش خورشیدی می‌باشد. یعقوبی (۱۹۹۶) نیز با

1- Diffuse

2- Hour angle

استفاده از برآورد صحیح کسر ساعات آفتابی از داده‌های اندازه‌گیری شده میزان ضریب صافی هوا را به صورت ماهانه برای شهر شیراز برآورد کرد.

با توجه به اینکه اکثر روش‌های ارائه شده در این زمینه برای اقلیم‌ها و شرایط خاص مقدار تابش خورشیدی را صحیح پیش‌بینی می‌کنند و یا بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در آن منطقه به دست آمده‌اند، ارائه روش مناسب برای پیش‌بینی صحیح میزان تابش خورشیدی برای اقلیم‌های مختلف ایران ضروری به نظر می‌رسد (ابراهیم پور، ۱۳۸۷) در تحقیقی که قبلاً که در این زمینه انجام شده روش‌های مختلف پیش‌بینی تابش خورشیدی را بررسی کرده و مشخص نموده که روش ارائه شده توسط واتانابه (۱۹۸۳) در رابطه با شرایط اقلیمی کشور ژاپن به شرطی که ضریب صافی هوا به صورت صحیح برآورد شود، برای شهرهای مختلف ایران نیز نتایج خوبی می‌دهد. هدف از این تحقیق ارائه رابطه‌ای جدید برای برآورد صحیح‌تر میزان تابش کل رسیده به یک سطح افقی برای شهرهای مختلف ایران می‌باشد. بدین منظور ابتدا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده میانگین ماهانه و روزانه شدت تابش خورشیدی رسیده به یک سطح افقی در سطح زمین توسط سازمان هواشناسی کشور (JRIMO، ۲۰۰۷) برای یک دوره ۱۴ ساله (۱۹۹۲-۲۰۰۵)، ضریب صافی هوا به صورت ماهانه و روزانه به دست آمد و با استفاده از دو روش برای شهرهای تبریز، اصفهان، بندرعباس، تهران، شیراز، کرمان، بوشهر، همدان و یزد به صورت ساعتی مقدار آن تخمین زده شد. سپس رابطه‌ای جدید برای محاسبه میزان تابش کل با استفاده از روش رگرسیون با داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه گردید و نتایج حاصل با داده‌های اندازه‌گیری شده میانگین روزانه و ماهانه، مورد مقایسه قرار گرفت.

### تابش خورشیدی

مقدار تابش خورشید در خارج از جو بر روی یک صفحه عمود بر شعاع خورشید، ثابت خورشیدی نامیده می‌شود. تابش ثابت خورشید به مقدار ۲ درصد به علت تغییراتی که در سطح خورشید صورت می‌گیرد، کاسته یا افزوده می‌شود و تقریباً برابر با  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$  می‌باشد. مقدار تابش خورشیدی را که در نهایت به سطح زمین می‌رسد تابش حقیقی می‌نامند

(مرادی، ۱۳۸۴). شرایط لحظه‌ای و بلند مدت جوی در یک منطقه اثر قابل ملاحظه‌ای در نوع و مقدار تابش حقیقی خورشید در آن منطقه دارد. هوای ابری باعث می‌شود که مقدار قابل ملاحظه‌ای از تابش حقیقی خورشید به خارج از جو منعکس گردد. ذرات آب، بخار و دود همچنین ذرات معلق دیگر در هوا باعث جذب یا پراکنده شدن تابش می‌گردند. در روزهای آفتابی ۱۵ درصد اشعه خورشید به صورت پراکنده به زمین می‌رسد، اما در روزهای ابری این مقدار ممکن است به ۱۰۰ درصد نیز برسد (سنجل<sup>۱</sup>، ۱۳۸۴).

### تعاریف

برای محاسبه مقدار تابش خورشیدی رسیده به یک سطح احتیاج به تعریف تعدادی از پارامتر و زاویه‌های خورشیدی وجود دارد که در ادامه توضیح داده می‌شوند (Bird, 1981) و (Maxwell, 1987).

### زاویه انحراف ( $\delta$ )

زاویه بین اشعه خورشید و صفحه استوایی است که از  $23/45$  درجه در تابستان تا  $-23/45$  در زمستان تغییر می‌کند و از روش زیر بر حسب درجه محاسبه می‌گردد:

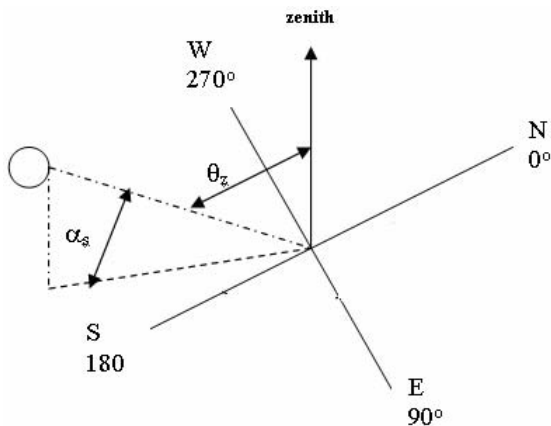
(۱)

$$\delta = \frac{180}{\pi} \left( \begin{array}{l} 0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B - 0.006758 \cos 2B \\ + 0.000907 \sin 2B - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B \end{array} \right)$$

در این رابطه  $n$  شماره روزها از اول ژانویه است و  $B$  نیز ضریبی است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

(۲)

$$B = 6.283185 \frac{n-1}{365}$$



شکل ۱: زوایای خورشیدی

زاویه شیب  $\delta$  در نقطه اعتدالین پاییز و بهار صفر و در انقلاب تابستانی در ۲۱ ژوئن  $+23/5$  درجه و در انقلاب زمستانی در نیمکره شمالی  $-23/5$  درجه می‌باشد.

زاویه ساعت ( $\omega$ ) و معادله زمان ( $E_t$ )

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

(۳)

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

برای محاسبه زاویه ساعت باید اختلاف ساعت ( $T_z^1$ ) نیز در منطقه مورد نظر مشخص گردد که مقدار آن را می‌توان به صورت زیر تقریب زد:

(۴)

$$T_z = (L + 7.5) / 15$$

در رابطه فوق  $L$  طول جغرافیای و بر حسب درجه است.  
زاویه ساعت بر حسب درجه برای هر ساعت از سال از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

(۵)

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

در رابطه فوق  $h$  ساعت موردنظر است.

محاسبه زاویه زنیت ( $\theta_z$ )

زاویه زنیت (سمت الراس)، زاویه بین اشعه خورشید و محور عمود بر سطح افقی (نرمال) می‌باشد (شکل ۱) و بر اساس مثلثات کروی می‌توان نوشت (بر حسب درجه):

(۶)

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \alpha_s$$

در رابطه فوق  $\phi$  عرض جغرافیای و  $\alpha_s$  زاویه فراز است.

محاسبه تابش خورشیدی رسیده بر روی سطوح افقی در خارج از جو

میزان کل تابش رسیده در جهت نرمال سطح در خارج از جو ( $G_{en}$ )

برای محاسبه میزان تابش رسیده (بر حسب  $W/m^2$ ) در جهت نرمال سطح (عمود بر سطح) به صورت روزانه از روش زیر استفاده می‌شود:

(۷)

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

در رابطه فوق  $G_{sc} = 1367 W/m^2$  ثابت خورشیدی،  $n$  شماره روزها از اول ژانویه است.

برای محاسبه  $B$  نیز عیناً از رابطه (۲) استفاده شده است.

میزان کل تابش رسیده در خارج از جو بر روی یک صفحه افقی ( $G_{eh}$ )

برای محاسبه این مقدار احتیاج به محاسبه زاویه زنیت  $\theta_z$  وجود دارد:

(۸)

$$G_{eh} = G_{en} \cos \theta_z$$

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

### ضریب صافی هوا ( $K_{th}$ )

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 قرار داشته باشد. ضریب صافی هوا را می‌توان برای هر روز، ساعت و یا ماه در نظر گرفت، مقدار  $K_{th}$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

(۹)

$$K_{th} = \frac{G_h}{G_{eh}}$$

در رابطه فوق  $G_h$  کل تابش رسیده به یک سطح افقی در سطح زمین است و اگر میزان تابش‌های خارج از جو و سطح زمین ( $G_h, G_{eh}$ ) به صورت ساعتی باشند، مقدار ساعتی  $K_{th}$ ، اگر به صورت متوسط روزانه یا ماهانه باشد، مقادیر روزانه  $K_{td}$  و ماهانه  $K_{tm}$  قابل محاسبه خواهند بود. اگر میزان تابش رسیده به یک سطح افقی در سطح زمین به درستی محاسبه گردد، می‌توان اذعان داشت که ضریب صافی هوا نیز درست محاسبه شده است. در این تحقیق با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده تابش کل ( $G_h$ ) توسط سازمان هواشناسی کشور که به صورت متوسط روزانه به ثبت رسیده‌اند، می‌توان میزان متوسط ماهانه و روزانه ضریب صافی هوا را محاسبه نموده و سپس میزان ضریب صافی هوا را به صورت ساعتی از یکی از دو روش زیر برآورد کرد:



روش اول: دوفی<sup>۱</sup> روش زیر را برای محاسبه میزان ساعتی ضریب صافی از روی میزان ماهانه آن ارائه کرده است:

(۱۰)

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

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

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

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

روش دوم: کولارس و همکاران<sup>۲</sup>، رابطه رگرسیونی برای نسبت تابش کل لحظه‌ای به تابش کل روزانه  $r_g$  را برای یک صفحه افقی به صورت زیر ارائه نمودند:

(۱۱)

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

در رابطه فوق  $T$  طول شبانه‌روز (۲۴ ساعت)،  $\omega$  زاویه ساعت بر حسب رادیان و  $\omega_s$  زاویه ساعتی خورشید هنگام غروب (بر حسب رادیان) است. ضرایب  $a'$ ،  $b'$  ضرایب تجربی هستند که از روابط زیر به دست 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 تابش کل و در نتیجه ضریب صافی هوا از رابطه ۹ قابل محاسبه است.

روش های مورد تحقیق برای پیش‌بینی تابش کل ( $G_h$ )

1- Duffie, Beckman, 1980

2-Collares, Perreira, Rabl, 1979

در تحقیقی که قبلاً در این زمینه انجام شده (ابراهیم پور، ۱۳۸۷)، روش‌های مختلف پیش‌بینی تابش خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته و معلوم شده که روش ارائه شده توسط واتانابه برای شرایط اقلیمی کشور ژاپن به شرطی که ضریب صافی هوا به صورت صحیح برآورد شود، برای شهرهای مختلف ایران نیز نتایج خوبی را می‌دهد. در این قسمت روش واتانابه و روش ارائه شده توسط سازمان<sup>۱</sup> Ashrae، معرفی می‌شوند:

روش واتانابه: در این روش میزان تابش پراکنده، مستقیم و کل برای شرایط اقلیمی کشور ژاپن از روابط زیر بر حسب  $W/m^2$  حساب شده است.

(۱۲)

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

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

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

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

(۱۳)

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

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

در روابط فوق  $G_{dh}$  تابش پراکنده،  $G_{bh}$  تابش مستقیم،  $K_{th}$  ضریب صافی هوا به صورت ساعتی و  $\alpha_s$  زاویه فراز بر حسب رادیان است.

روش Ashrae: در این روش ابتدا باید میزان تابش مستقیم خورشیدی رسیده به سطح در جهت نرمال  $G_{bn}$  محاسبه گردد:

1- Ashrae, 1995

(۱۴)

$$G_{bn} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin \alpha_s}\right)}$$

در رابطه فوق  $A$  تابش ظاهری خورشیدی،  $B$  ضریب خاموشی جو (بی بعد) و  $\alpha_s$  زاویه فراز خورشیدی می باشد. مقادیر  $A$  و  $B$  به صورت ماهانه و برای یک روز آفتابی و صاف از جدول ۱ بر حسب  $(Btu/h.ft^2)$  به دست می آیند. در این روش مقدار  $G_{bn}$  بدون در نظر گرفتن شرایط اقلیمی از قبیل اثرات روزهای ابری، گرد و غبار، بخار آب و ارتفاع منطقه از سطح دریا محاسبه می شود.

جدول ۱: ضرایب ثابت  $A, B, C$

|   | Jan   | Feb   | Mar   | Apr   | May   | June  | July  | Aug   | Sept  | Oct   | Nov   | Dec   |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | 390   | 385   | 376   | 360   | 350   | 345   | 344   | 351   | 365   | 378   | 387   | 391   |
| B | 0.142 | 0.144 | 0.156 | 0.180 | 0.196 | 0.205 | 0.207 | 0.201 | 0.177 | 0.160 | 0.149 | 0.142 |
| C | 0.058 | 0.060 | 0.071 | 0.097 | 0.121 | 0.134 | 0.136 | 0.122 | 0.092 | 0.073 | 0.063 | 0.057 |

بنابراین مقدار تابش مستقیم روی یک صفحه افقی در سطح زمین از رابطه زیر قابل محاسبه است:

(۱۵)

$$G_{bh} = G_{bn} \cos \theta_z$$

مقدار تابش پراکنده نیز از رابطه زیر حساب می گردد.

(۱۶)

$$G_{dh} = CG_{bn}$$

ضریب  $C$  نیز به صورت ماهانه و بی بعد بوده و از جدول ۱ به دست می‌آید.

رابطه جدید ارائه شده

در این قسمت یک رابطه برای محاسبه شدت تابش خورشیدی رسیده به سطح افقی که در تمام مناطق اقلیمی ایران مقدار آن را صحیح پیش‌بینی نماید، ارائه می‌گردد. در رابطه جدید از معادله زیر برای محاسبه میزان تابش خورشیدی کل ( $G_h$ ) رسیده به یک سطح افقی استفاده شده است. این رابطه بر اساس مقایسه نتایج روش Ashrae و داده‌های واقعی برای شهرهای مختلف ایران از طریق روش رگرسیون به دست آمده است:

(۱۷)

$$G_h = \frac{G_{en}(C + \cos\theta_z)}{\exp\left(\frac{B}{\sin\alpha_s}\right)} \times \frac{Z_1}{Z_2}$$

در رابطه فوق، ضرایب  $B$  و  $C$  ثابت بوده و از جدول ۱ حاصل می‌شوند، ضرایب  $Z_1$  و  $Z_2$  نیز از روابط زیر به دست می‌آیند که در این روابط  $n$  شماره روزها از اول ژانویه است:

$$Z_1 = a_1 + \frac{b_1}{K_{th}} \quad a_1 = 0.0203, b_1 = 0.8486$$

$$Z_2 = a_2 + b_2 \sin\left(\frac{2\pi n}{a_3} + b_3\right)$$

$$a_2 = 1.0429, b_2 = 0.0667, a_3 = 594, b_3 = 2.86$$

نتایج محاسبات

در این پژوهش ابتدا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده، شدت تابش خورشید رسیده به یک سطح افقی (به صورت میانگین روزانه) در سطح زمین که توسط سازمان هواشناسی کشور انجام شده، ضریب صافی هوا به صورت ماهانه به دست آمد و سپس مقدار ضریب صافی هوا

با استفاده از دو روش دوفی و کولارس از روی روابط ۱۰ و ۱۱ برای شهرهای تبریز، اصفهان، بندرعباس، تهران، شیراز، کرمان، بوشهر، همدان و یزد به صورت ساعتی تخمین زده شد. در مرحله بعد، با استفاده از روش های واتانابه و Ashrae و همچنین رابطه جدید ارائه شده برای پیش بینی شدت تابش خورشیدی، مقدار آن تخمین زده شده و با نتایج اندازه گیری شده توسط سازمان هواشناسی کشور برای شهرهای مذکور مقایسه می گردد.

مقادیر میانگین خطای اریبی (MBE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد متوسط خطا (MPE) برای شهرهای مذکور در جداول ۲ الی ۴ بین داده های تابش کل اندازه گیری شده و مدل های مختلف از نتایج روزانه و ماهانه نشان داده شده اند.

جدول ۲ مقادیر RMSE, MBE, MPE ماهانه را از روش های مختلف با ضریب صافی محاسبه شده از روش دوفی نشان می دهد و دیده می شود که روش جدید و روش واتانابه نتایج بهتری را به دست داده اند. در جدول ۳ نیز مقادیر RMSE, MBE, MPE روزانه برای روش جدید و روش واتانابه را برای سه شهر تبریز، اصفهان و بندرعباس با ضریب صافی محاسبه شده از روش دوفی نشان داده شده اند. همچنین در جدول ۴ مقادیر روش جدید و روش واتانابه به این صورت مقایسه شده اند که ابتدا از مدل کولارس مقدار تابش کل ( $G_h$ ) به صورت ساعتی محاسبه گردیده و سپس از رابطه ۹ میزان ضریب صافی هوا به دست آمده و از این ضریب صافی در معادلات روش واتانابه و روش جدید استفاده و مشاهده می شود که نتایج بهتری حاصل شده است. شکل های ۲ تا ۷ نتایج محاسبه تابش خورشیدی کل از روش های مختلف را برای چند شهر انتخاب شده به صورت ماهانه و یا روزانه نمایش می دهند.

جدول ۲: مقادیر **RMSE**, **MBE**, **MPE** ماهانه روش های مختلف با ضریب صافی محاسبه شده از روش دوفی

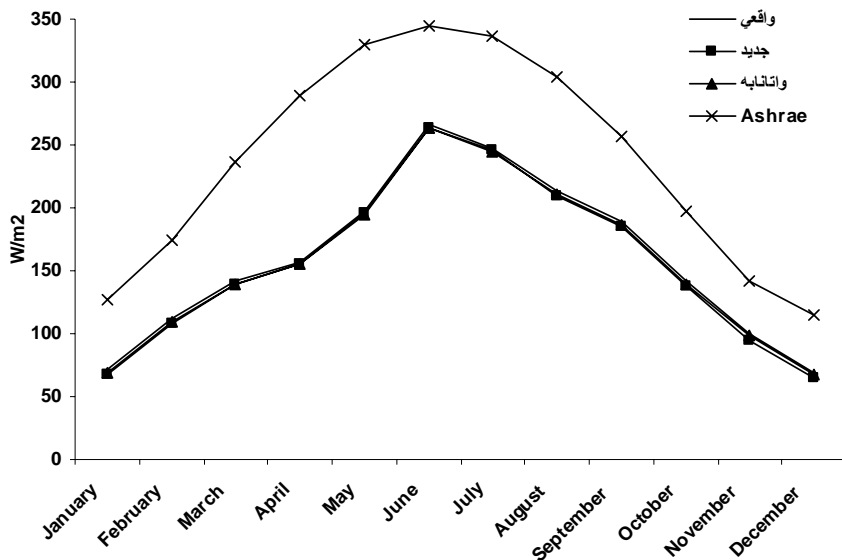
| روش / شهر | <b>MBE</b> |          |               | <b>RMSE</b> |          |               | <b>MPE%</b> |          |               |
|-----------|------------|----------|---------------|-------------|----------|---------------|-------------|----------|---------------|
|           | جدید       | واتانابه | <i>Ashrae</i> | جدید        | واتانابه | <i>Ashrae</i> | جدید        | واتانابه | <i>Ashrae</i> |
| تهران     | -5.20      | -3.88    | 2.38          | 5.41        | 4.01     | 15.17         | 2.51        | 1.74     | -2.47         |
| شیراز     | -2.33      | -3.95    | 38.18         | 2.53        | 4.04     | 42.25         | 1.07        | 1.82     | -16.56        |
| کرمان     | -2.73      | -3.97    | 28.68         | 2.92        | 4.05     | 33.25         | 1.24        | 1.81     | -13.36        |
| بوشهر     | -1.92      | -3.77    | 49.47         | 2.18        | 3.86     | 51.58         | 0.87        | 1.83     | -25.31        |
| همدان     | -3.40      | -3.24    | 46.30         | 3.65        | 3.34     | 50.56         | 1.99        | 1.75     | -25.80        |
| یزد       | -3.11      | -3.86    | 26.39         | 3.36        | 3.98     | 33.08         | 1.47        | 1.78     | -13.66        |
| تبریز     | -3.46      | -2.37    | 78.74         | 3.74        | 2.47     | 84.02         | 2.88        | 1.71     | -53.36        |
| اصفهان    | -2.52      | -3.33    | 58.91         | 2.80        | 3.45     | 62.63         | 1.45        | 1.77     | -28.78        |
| بندرعباس  | -1.45      | -3.80    | 59.66         | 1.67        | 3.88     | 61.98         | 0.67        | 1.85     | -27.96        |

جدول ۳: مقادیر **RMSE**, **MBE**, **MPE** روزانه روش های مختلف با ضریب صافی محاسبه شده از روش دوفی

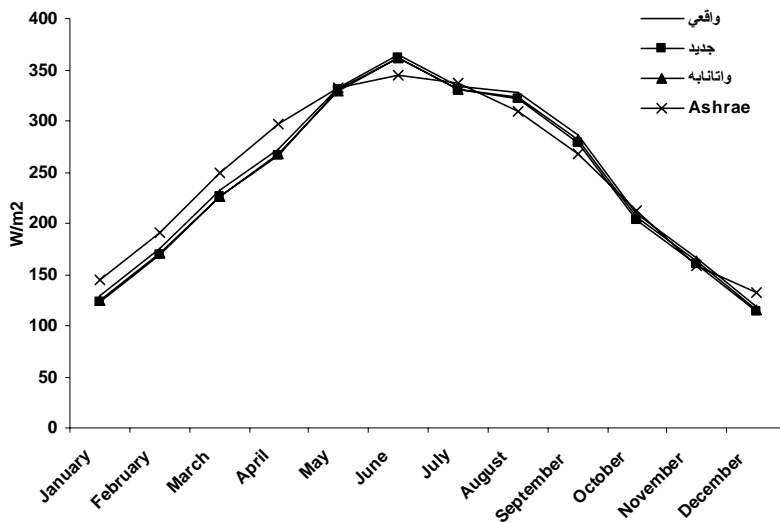
| روش / شهر | <b>MBE</b> |          | <b>RMSE</b> |          | <b>MPE%</b> |          |
|-----------|------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
|           | جدید       | واتانابه | جدید        | واتانابه | جدید        | واتانابه |
| تبریز     | -3.43      | -2.35    | 19.81       | 19.56    | 1.25        | 0.04     |
| اصفهان    | -2.48      | -3.29    | 29.08       | 29.18    | -1.09       | -0.77    |
| بندرعباس  | -1.40      | -3.76    | 19.33       | 19.65    | -0.20       | 1.00     |

جدول ۴: مقادیر  $RMSE$ ,  $MBE$ ,  $MPE$  روزانه روش واتانابه و روش جدید با ضریب صافی محاسبه شده از روش کولارس

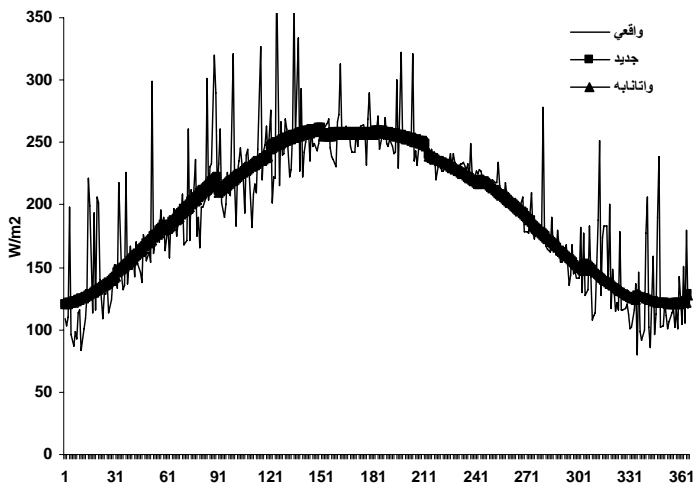
| روش / شهر | $MBE$ |          | $RMSE$ |          | $MPE\%$ |          |
|-----------|-------|----------|--------|----------|---------|----------|
|           | جدید  | واتانابه | جدید   | واتانابه | جدید    | واتانابه |
| تبریز     | 1.57  | -0.70    | 2.31   | 0.92     | -1.26   | 0.52     |
| اصفهان    | -0.84 | -1.33    | 1.40   | 1.42     | 0.50    | 0.72     |
| بندرعباس  | 0.63  | -1.44    | 1.14   | 1.54     | -0.38   | 0.72     |



شکل ۲: نتایج تابش خورشیدی کل به صورت ماهانه از روش های مختلف با ضریب صافی محاسبه شده از روش دوفی برای ایستگاه تبریز

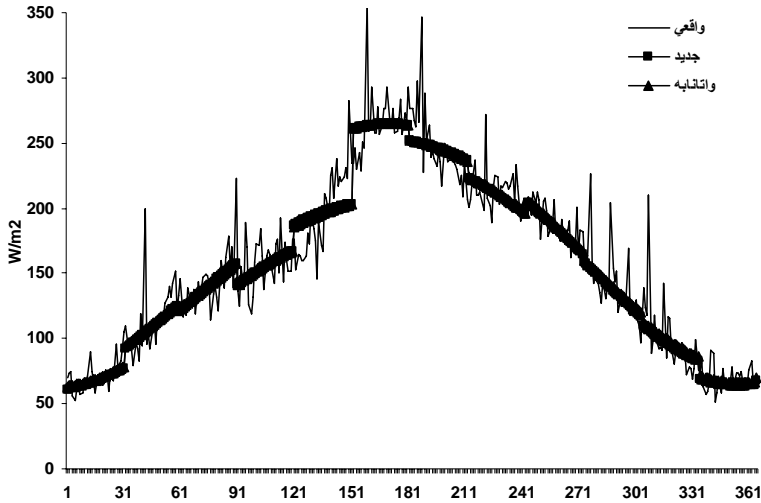


شکل ۳: نتایج تابش خورشیدی کل به صورت ماهانه از روش های مختلف با ضریب صافی محاسبه شده از روش دوفی برای ایستگاه تهران

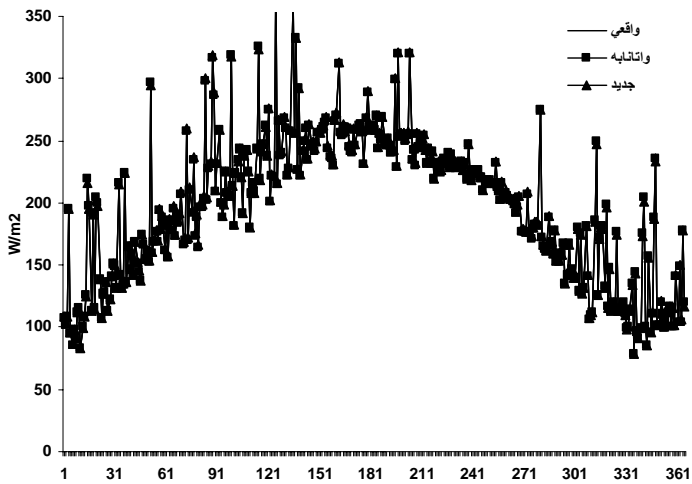


شکل ۴: نتایج تابش خورشیدی کل به صورت روزانه از روش های مختلف با ضریب صافی محاسبه شده از روش دوفی برای ایستگاه اصفهان

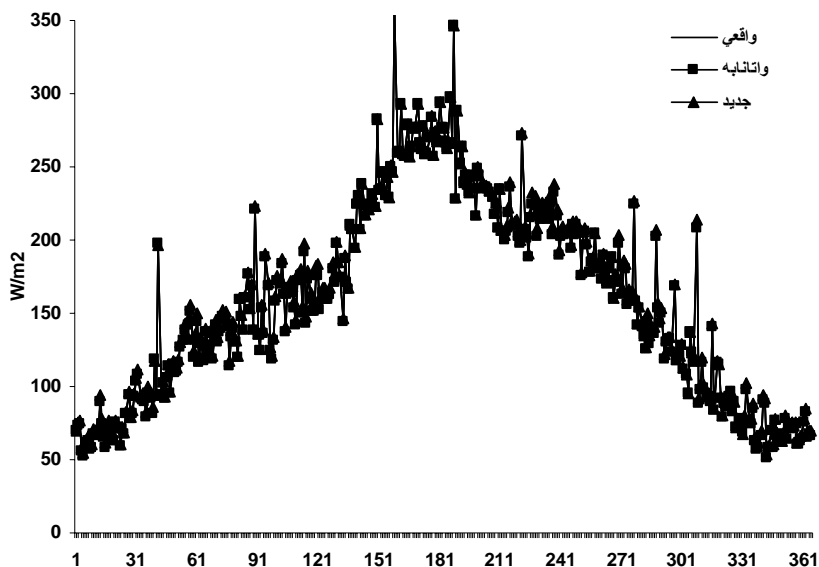




شکل ۵: نتایج تابش خورشیدی کل به صورت روزانه از روش های مختلف با ضریب صافی محاسبه شده از روش دوفی برای ایستگاه تبریز



شکل ۶: نتایج تابش خورشیدی کل به صورت روزانه از روش های مختلف با ضریب صافی محاسبه شده از روش کولارس برای ایستگاه اصفهان



شکل ۷: نتایج تابش خورشیدی کل به صورت روزانه از روش های مختلف با ضریب صافی محاسبه شده از روش کولارس برای ایستگاه تبریز

### بحث و ارائه پیشنهادات

در این تحقیق میزان تابش کل از روش های مختلف و یک روش پیشنهادی جدید مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از محاسبات انجام شده توسط این روش ها با داده های ماهانه و روزانه اندازه گیری شده توسط سازمان هواشناسی کشور برای شهرهای منتخب ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله را می توان به صورت زیر عنوان کرد:

- ۱- در جدول ۲ دیده می شود که روش پیشنهادی جدید و روش واتانابه نتایج خوبی را ارائه نموده اند و در بسیاری از شهرها نتایج روش جدید بهتر می باشد.
- ۲- با توجه به جداول ۳ و ۴ در صورتی که ضریب صافی هوا از روش کولارس محاسبه گردد، نتایج روزانه روش پیشنهادی جدید و روش واتانابه به نتایج اندازه گیری شده بسیار نزدیک تر بوده و در این حالت نیز روش پیشنهادی جدید نتایج را با دقت بیشتری ارائه می کند.

۳- شکل های ۴ تا ۷ نیز مقایسه روش پیشنهادی جدید و روش واتانابه را برای دو حالت محاسبه ضریب صافی هوا (کولارس و دوفی) به صورت روزانه نشان می دهند و باز ملاحظه می شود که در صورتی که ضریب صافی هوا از روش کولارس محاسبه گردد، نتایج بهتری به دست می آید.

۴- در روش Ashrae نیز چون ضرایب A, B, C به صورت صحیح برآورد نشده و از داده های اندازه گیری شده برای اقلیمی خاص به دست آمده اند، نتیجه خوبی برای پیش بینی میزان تابش خورشیدی ارائه نمی دهد.

۵- با توجه به اینکه داده های اندازه گیری شده ساعتی تابش کل موجود نمی باشند، بنابراین نمی توان گفت که کدام روش میزان تابش خورشیدی کل را به صورت ساعتی بهتر پیش بینی می نماید و تمام مقایسه ها در این تحقیق بر مبنای داده های اندازه گیری شده روزانه و ماهانه میانگین تابش کل بوده است.

با توجه به مطالب فوق پیشنهاد می گردد که:

الف) در صورت موجود بودن داده های اندازه گیری شده میانگین روزانه تابش کل مقدار ساعتی آن و همچنین مقدار ساعتی ضریب صافی هوا را از روش کولارس با دقت زیادی قابل محاسبه خواهد بود.

ب) اگر داده های اندازه گیری شده روزانه در دسترس نباشند، می توان از روش دوفی، با داشتن میزان ضریب صافی ماهانه، مقدار ساعتی آن را از رابطه ۱۰ محاسبه کرده و سپس از روش پیشنهادی جدید یا روش واتانابه مقدار تابش کل را به صورت ساعتی برآورد نمود.

ت) می توان از روش دوفی با داشتن میزان ضریب صافی ماهانه، مقدار ساعتی آن را از رابطه ۱۰ محاسبه کرده و سپس از روش پیشنهادی جدید مقدار تابش کل را به صورت میانگین روزانه برآورد نمود و این مقدار روزانه به دست آمده را از روش کولارس به ساعتی تبدیل کرد که این روش نسبت به حالت (ب) نتایج بهتری را ارائه می کند.

علائم و اختصارات

$\delta$ : زاویه انحراف

$n$ : شماره روزها از اول ژانویه

$T_z$ : اختلاف ساعت

$h$ : ساعت

$\varphi$ : عرض جغرافیایی

$G_{sc}$ : ثابت خورشیدی

$\omega$ : زاویه ساعت

$E_t$ : معادله زمان

$L$ : طول جغرافیایی

$\theta_z$ : زاویه سمت

$\alpha_s$ : زاویه فراز

$K_{th}$ : ضریب صافی هوا (ساعتی)

$G_{en}$ : تابش رسیده در جهت عمود بر سطح در خارج از جو

$G_{eh}$ : تابش رسیده در خارج از جو 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

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

$\omega_s$ : زاویه ساعتی خورشید هنگام غروب

$K_{nc}$ : ضریب تابش مستقیم نرمال در حالت آسمان صاف

$K_{dh}$ : نسبت تابش پراکنده

$B = 6.283185 \frac{n-1}{365}$ : ضریب وابسته به روز و برابر با

## منابع

- ۱- ابراهیم پور، ع. (۱۳۸۷)، «ارائه روابطی برای طراحی پنجره‌ها با کمترین مصرف انرژی سالیانه برای ایران»، پایان‌نامه دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۲- مرادی، س. (۱۳۸۴)، «تنظیم شرایط محیطی»، تهران، چاپ آشیان، صفحه ۷۹-۱۰۴.
- ۳- بهادری نژاد، م. و س.ع. میر حسینی (۱۳۸۴)، «ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران»، سومین همایش بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان.
- ۴- سنجل (۱۳۸۴)، «گرمایش و سرمایش رویکردی نو»، ترجمه ک. امیر اصلانی، شرکت تولیدی و صنعتی انرژی کشور، آبان، صفحه ۳۶-۳۹ و ۸۱-۱۱۴.
- 5- Daneshyar M. (1978), "Solar radiation statistics for Iran", *Solar Energy*, Vol. 21, PP. 345-349.
- 6- Sabziparvar A. (2007), "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 Photo Energy*.
- 7- Yaghoubi M. A., Sabzevari A. (1996), "Further data on solar radiation in Shiraz, Iran", *Renewable Energy*, Vol. 7, Issue. 4, PP. 393-399.
- 8- Sabbagh J. A., Sayigh A. A. M., Al -Salam E. M. A. (1976), "Estimation of the total solar radiation from meteorological data", *Solar Energy*, Vol. 19, No. 3, PP. 307-311.
- 9- Paltridge. G. W., Proctor D. (1977), "Monthly mean solar radiation statistics for Australia", *Solar Energy*, Vol. 18, No. 3, PP. 235- 243.
- 10- Bird R. E., Hulstrom R. L. (1981), "A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces", *Solar Energy Research Institute*, Technical Report SERI/TR-642-761.
- 11- Maxwell E. (1987), "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.

- 12- Duffie J. A., Beckman W. A. (1980), "*Solar energy of thermal processes*", John Wiley, New York.
- 13- Collares, Perreira M., Rabl A. (1979), "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.
- 14- IRIMO, "*Islamic Republic of Iran Meteorological Office*", Data Center, Tehran , Iran, <http://www.weather.ir/>
- 15- Zhang Q.J. Huang, L. (2001 ), "**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.
- 16- El-Sebaili A. (2005), "Estimation of Global Solar Radiation on Horizontal Surfaces Over Egypt", *Egypt. J. Solids*, Vol. 28, No. 1.
- 17- Watanabe T. (1983), "**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.
- 18- ASHRAE (1995), "*Handbook, heating, ventilating, and air-conditioning applications*", ashrae publications.