

## واسنجی دو مدل برآورد تابش خورشیدی و توسعه دو مدل تابش تک پارامتری بر اساس ابرناکی در مشهد، ایران

آمنه میان‌آبادی<sup>۱\*</sup>، مهرانوش اقتداری<sup>۲</sup>، علیرضا فریدحسینی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۱۶، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۸/۱۷

### چکیده

میزان تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین یکی از کاربردی‌ترین پارامترهایی است که در پروژه‌ها و مدل‌سازی‌های هیدرولوژی، کشاورزی، هواشناسی و اقلیمی از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اهمیت این پارامتر، معادلات بسیاری جهت برآورد آن توسط محققان در سراسر جهان پیشنهاد شده است. در این مطالعه، دو مدل مهم تابش خورشیدی شامل مدل آنگستروم- پرسکات و گارج-گارج در منطقه مشهد با توجه به داده‌های موجود و به روش حداقل مربعات خطا واسنجی شده و ضرایب مدل‌ها به دست آمد. همچنین دو مدل جدید تک پارامتری بر پایه ابرناکی توسعه یافته که هر دو از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند. ضرایب مدل آنگستروم- پرسکات در این مطالعه به ترتیب به صورت  $a=0.25$  و  $b=0.42$  به دست آمد. همچنین ضرایب مدل گارج-گارج نیز به ترتیب  $X=0.27$  و  $Y=0.42$  و  $Z=-0.0028$  تعیین شد. پارامترهای آماری ضریب تبیین،  $RMSE$ ،  $MBE$  و  $t$  نشان دهنده قابل قبول بودن این ضرایب می‌باشد. طبق نتایج حاصل شده این پارامترها برای معادله آنگستروم- پرسکات در مرحله واسنجی به ترتیب برابر  $0.1368$ ،  $2.4648$ ،  $0.1749$ ،  $0.1361$  و  $2.361$  برای معادله گارج-گارج برابر  $0.1748$ ،  $2.4553$ ،  $0.1073$ ،  $1.8519$  می‌باشند. همچنین پارامترهای آماری نشان می‌دهد که معادلات توسعه یافته در این مطالعه نیز از دقت قابل قبولی حتی نسبت به معادله آنگستروم- پرسکات برخوردار می‌باشند. این پارامترها نیز برای مدل شماره ۱ به ترتیب برابر  $0.9636$ ،  $1.4927$ ،  $0.2504$  و  $5.4893$  و برای مدل شماره ۲ برابر  $0.9153$ ،  $2.3767$ ،  $0.66$  و  $9.3504$  به دست آمد. بنابراین با توجه به این که جهت محاسبه این معادلات تنها پارامتر ابرناکی مورد نیاز است، کاربرد آن‌ها و به خصوص مدل شماره ۱ در محاسبه تابش توصیه می‌شود.

**واژگان کلیدی:** تابش خورشیدی، مدل آنگستروم- پرسکات، مدل گارج-گارج، مدل توسعه یافته، ابرناکی.

## مقدمه

دانستن میزان تابش خورشیدی در هر محل برای بسیاری از مسائل کاربردی از جمله تخمین تبخیر-تعرق، طراحی معماری، مدل‌های رشد محصولات کشاورزی و غیره، اهمیت فراوان دارد. اما علی‌رغم اهمیت اندازه‌گیری این پارامتر، به دلیل مشکلات اقتصادی، وسایل و ابزار مناسب اندازه‌گیری تابش مانند سایر پارامترهای هواشناسی از جمله دما و بارش در همه مناطق موجود نبوده و بنابراین باید به گونه‌ای آن را تخمین زد (Almorox et al. 2005) (Iziomon and Mayer, 2002). این مسئله باعث ترغیب دانشمندان و محققان به سوی ارائه و استفاده از مدل‌های تابش شده است. مقادیر تابش به روش‌های مختلفی از جمله روابط تجربی و رگرسیونی، استفاده از فن‌سنجش از دور و شبکه‌های عصبی و میان‌یابی خطی محاسبه می‌شوند. اما از میان همه این روش‌ها معادلات تجربی کاربرد گسترده‌تری داشته و از محبوبیت بیشتری نیز بین کاربران برخوردار است. به طور کلی معادلات تجربی برآورد تابش طول موج کوتاه خورشیدی را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد. اول معادلاتی که مبنای آن‌ها ساعات آفتابی است (Angstrom, 1924, Prescott, 1940)، دوم معادلاتی که مبنای آن‌ها دمای هوا است (Bristow and Campbell, 1984) و سوم معادلاتی که بر مبنای ابرناکی محاسبه می‌شوند (Ehnberg and Bollen, 2005). اگرچه تعداد زیادی از پارامترهای هواشناسی مانند رطوبت نسبی، ابرناکی، دما، ساعات آفتابی و میزان آلودگی و گرد و غبار بر مقدار تابش خورشیدی مؤثر می‌باشند، اما تحقیقات متعدد نشان داده است که تأثیر ساعات آفتابی بر مقدار تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین، بیش از سایر پارامترها است. بر این اساس معادلات مختلفی برای تخمین مقدار تابش خورشیدی پیشنهاد شده است که یکی از مهمترین آن‌ها، معادله آنگستروم می‌باشد که در سال ۱۹۲۴ ارائه شد (Angstrom, 1924). این معادله بعدها توسط پرسکات اصلاح گردید و به معادله آنگستروم-پرسکات مشهور شد (Almorox et al. 2005). محققان زیادی در سراسر دنیا به واسنجی این معادله برای مناطق مختلف پرداخته‌اند. تحقیقات یانگ و همکاران (Yang et al., 2006) نشان داد

که معادله آنگستروم-پرسکات در مطالعات و مدل‌سازی‌های هیدرولوژی و کشاورزی کاربرد بسیار گسترده‌ای دارد. آلموروکس و همکاران (Almorox et al., 2005) نیز تابش روزانه را برای منطقه تولدو<sup>۱</sup> اسپانیا به روش آنگستروم-پرسکات مورد بررسی قرار دادند تا بهترین تخمین ماهانه را برای ضرایب این معادله به دست آورند. آن‌ها از پارامترهای آماری RMSE, MBE و t برای انتخاب بهترین ضرایب استفاده نمودند و سپس ضرایب را برای هر ماه به طور جداگانه محاسبه کرده و معادله را واسنجی نمودند. رحمان (Rehman, Sh., 1998) با استفاده از ۱۶ مدل مختلف برآورد تابش، مقادیر تابش محاسبه شده را در عربستان با مقادیر تابش اندازه‌گیری شده با پیرانومتر مقایسه کرد و از بین آن‌ها بهترین مدل را که مدل خطی آنگستروم-پرسکات با ضرایب  $a=0.3465$  و  $b=0.352$  بود، انتخاب نمود. الاجیب و همکارانش (Elagib, 1998) در بحرین، مدل جدیدی برای تخمین تابش خورشیدی با کم‌ترین خطا و حداقل تعداد پارامترهای هواشناسی مورد نیاز و تنها با استفاده از داده‌های دما، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و تابش فرازمینی، ارائه کردند. در این تحقیق، بررسی داده‌ها برای ماه‌های ژانویه تا ژوئن و ژوئیه تا دسامبر به طور جداگانه انجام شد و برای هر کدام سه معادله بر اساس ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و دما و نیز رطوبت نسبی، دما و ساعات آفتابی به دست آمد.

در سال ۲۰۰۶ اسکیکر (Skeiker, 2006) در استان داماسکو سوریه با استفاده از هفت پارامتر مختلف هواشناسی و جغرافیایی، ۱۳ معادله یک تا هفت متغیری را برای محاسبه تابش خورشیدی مورد بررسی قرار داد و با وجود قابل قبول بودن همه معادلات، معادله ارائه شده با هفت متغیر را به عنوان بهترین مدل از نظر آماری انتخاب نمود. یانگ و همکاران نیز (Yang et al., 2006) مدلی جهانی برای تخمین تابش ساعتی، روزانه و متوسط روزانه در هر ماه ارائه نمودند. نکته مهم و جدید در این معادله، استفاده از پارامترهای فشار سطحی، توزیع جهانی ضخامت ازن، آب قابل بارش و توزیع جهانی ضریب تیرگی آنگستروم علاوه بر ساعات آفتابی است. طغرل و اونات

مدل آنگستروم- پرسکات و مدل گارج- گارج در اقلیم نیمه خشک مشهد واسنجی شد. همچنین دو مدل جدید بر اساس ابرناکی توسعه یافته و نتایج آن با مقادیر اندازه گیری شده توسط پیرانومتر مقایسه گردید.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

برای انجام این تحقیق از اطلاعات ایستگاه همدیدی شهر مشهد که دارای طول جغرافیایی ۵۹/۳۸ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۶/۱۶ درجه شمالی و ارتفاع ۹۹۹/۲ متر از سطح دریا می‌باشد، استفاده شده است. شهر مشهد به دلیل قرار گرفتن در مسیر توده‌های مختلف آب و هوایی دارای شرایط اقلیمی خاصی بوده و تنوع اقلیمی ویژه‌ای دارد. با وجود این امر و با توجه به میانگین بارش و دمای سالانه مشهد (به ترتیب ۲۵۵/۲ میلی‌متر و ۱۴/۱ درجه سلسیوس) اقلیم این منطقه به روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، در گروه مناطق نیمه خشک قرار دارد. میانگین ساعات آفتابی سالانه مشهد ۲۸۹۲ ساعت در سال و میانگین سالانه تابش رسیده به سطح زمین تقریباً ۱۹۵ وات بر متر مربع است.

در این مطالعه، پارامترهای دما، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و بارش برای برآورد مقدار تابش رسیده به سطح زمین ( $R_s$ ) مورد استفاده قرار گرفتند. برای مقایسه نتایج به دست آمده با مقادیر واقعی نیز، از داده‌های تابش اندازه گیری شده توسط پیرانومتر که از ابتدای سال ۱۹۹۴ تا پایان ۲۰۰۳ در دسترس بود، استفاده شد. همچنین مقادیر تابش فرازمینی ( $R_{II}$ ) با استفاده از رابطه ارائه شده توسط آلن و همکاران (Allen et al., 1998) تخمین زده شد. لازم به ذکر است که پس از بررسی داده‌ها، برای افزایش دقت محاسبات، مقادیر پرت و غیر قابل اطمینان حذف شده و محاسبات تنها با داده‌های قابل قبول انجام شد.

(Togrul, I. T. and E. Onat, 1999) با استفاده از شش پارامتر هواشناسی، معادله رگرسیونی خطی چند متغیره‌ای برای تخمین تابش در منطقه الازیگ<sup>۱</sup> ترکیه به دست آوردند. آن‌ها علاوه بر پارامترهای معمول از دمای خاک نیز استفاده نمودند. در تحقیق ارائه شده توسط ایزومون و مایر (Iziomon and Mayer, 2002) مدل‌های کاستن<sup>۲</sup> (بر مبنای ابرناکی) و آنگستروم- پرسکات، گارج- گارج<sup>۳</sup> و سیوکف<sup>۴</sup> (بر مبنای ساعات آفتابی) مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق در دو منطقه کوهستانی فلدبرگ<sup>۵</sup> و منطقه مسطح برمگارتن<sup>۶</sup> انجام شد که در نهایت مدل آنگستروم- پرسکات و گارج- گارج به عنوان بهترین مدل‌های برآورد تابش خورشیدی انتخاب شدند. در ایران نیز سبزی‌پرور و شتایی (Sabziparvar and Shetaee, 2007) در نواحی خشک و نیمه خشک غرب و شرق ایران، شش معادله پالتریج، صباغ، دانشیار، پالتریج اصلاح شده، صباغ اصلاح شده و دانشیار اصلاح شده را مورد بررسی قرار داده و مقدار تابش را تخمین زدند. لویز و همکاران (Lopez et al. 2000) نیز با استفاده از داده‌های تابش‌سنجی شش ایستگاه در اسپانیا، مدل‌های مختلف تابش خورشیدی را ارزیابی نمودند. همچنین سوزن (Sozne, A., 2005) مقدار تابش خورشیدی را با استفاده از شبکه‌های عصبی برای مناطق مختلف کشور ترکیه محاسبه نمود که نتایج به دست آمده، نشان دهنده قابل اعتماد بودن این تکنیک برای محاسبه تابش خورشیدی در اقلیم ترکیه می‌باشد. همچنین در ایران در این زمینه فعالیت‌هایی توسط خلیلی (۱۳۷۶) و غلیزاده و خلیلی (۱۳۸۸) نیز انجام شده است. غلیزاده و خلیلی معادله آنگستروم- پرسکات را در مشهد با تنها ۴ سال داده انجام داده اند که در این مقاله جهت اطمینان بیشتر از ۱۰ سال داده استفاده شده است.

به این ترتیب با توجه به اهمیت تابش رسیده به سطح زمین و کاربرد گسترده آن در پروژه‌ها و مطالعات مختلف هواشناسی، اقلیم‌شناسی، هیدرولوژی و کشاورزی در این مقاله دو مدل ارائه شده برای برآورد تابش خورشیدی شامل

1. Elazig  
3. Garg- Garg  
5. Feldberg

2. Kasten  
4. Sivekov  
6. Bremgarten

### واسنجی معادلات برآورد تابش خورشیدی

همان طور که ذکر شد برای برآورد میزان تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین ( $R_s$ )، تاکنون تلاش‌های فراوانی صورت گرفته و معادلات بسیاری ارائه شده است. در این تحقیق دو روش محاسبه  $R_s$  شامل معادله آنگستروم- پرسکات و معادله گارج- گارج بررسی و ضرایب آن‌ها برای ایستگاه مشهد تخمین زده شد. به این منظور از روش حداقل مربعات خطا استفاده گردید.

### معادله آنگستروم- پرسکات

این معادله به دلیل سادگی، کاربرد گسترده‌ای در محاسبه تابش رسیده به سطح زمین دارد و در برآورد تبخیر- تعرق به روش پنمن-مانتیث- فائو برای مناطقی که روش مناسبی برای محاسبه تابش آن‌ها ارائه نشده و یا مقادیر تابش آن‌ها اندازه‌گیری نمی‌شود، مورد استفاده قرار

می‌گیرد (Allen et al., 1998). معادله آنگستروم- پرسکات به طور کلی به صورت زیر می‌باشد که در آن ضرایب  $a$  و  $b$  برای هر منطقه قابل محاسبه است.

$$R_s = R_a \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

فائو<sup>۱</sup> این ضرایب را به ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۰/۵ پیشنهاد کرده و بنابراین رابطه بالا را به شکل زیر ارائه نموده است:

$$R_s = R_a \left( 0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

در این معادلات  $R_a$  و  $R_s$  به ترتیب چگالی شار تابش خورشیدی و تابش فرازمینی بر حسب  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$  می‌باشد. معادله (۱) را می‌توانیم به صورت ماتریسی و به شکل رابطه (۳) بنویسیم:

$$\begin{bmatrix} R_{s(1)} \\ R_{s(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{s(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{a(1)} & (n/N) R_{a(1)} \\ R_{a(2)} & (n/N) R_{a(2)} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ R_{a(n)} & (n/N) R_{a(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (3)$$

در نظر می‌گیریم که البته بدیهی است که نسبت به مقادیر واقعی خطایی وجود دارد که هدف این روش به حداقل رساندن این خطا می‌باشد. بنابراین رابطه (۳) به شکل رابطه (۴) تبدیل خواهد شد:

که در آن  $n$  بیانگر شماره روز است. رابطه فوق  $n$  معادله و ۲ مجهول دارد ( $a, b$ ) و چون  $n > 2$  دستگاه فوق از نظر ریاضی جواب صریح و دقیقی ندارد. بنابراین برای تعیین ضرایب فوق می‌توان از روش حداقل مربعات خطا استفاده کرد. در این روش ابتدا مقادیری بهینه از ضرایب را

$$\begin{bmatrix} R_{s(1)} \\ R_{s(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{s(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{a(1)} & (n/N) R_{a(1)} \\ R_{a(2)} & (n/N) R_{a(2)} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ R_{a(n)} & (n/N) R_{a(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{(1)} \\ e_{(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ e_{(n)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

طبق رابطه (۶) برابر  $k$  در نظر بگیریم، آنگاه با توجه به قضیه گاس- مارکوف (Plackett, 1950) رابطه (۷) را خواهیم داشت:

که در این رابطه  $e_{(1)}$  تا  $e_{(n)}$  مقادیر خطای محاسبه ضرایب در روزهای اول تا  $n$  ام می‌باشد. حال اگر مجموع مربعات<sup>۲</sup> خطا را به شکل رابطه (۵) و ماتریس ضرایب را

## معادله گارج- گارج

بخار آب موجود در جو باعث جذب مقداری از تابش خورشیدی پیش از رسیدن به سطح زمین می‌شود. از طرفی بخار آب به خاطر اثر شکست نور بر شفافیت جو نیز اثر می‌گذارد. به عنوان مثال محاسبات انجام شده توسط تام و تورمالا (Tamm and Thormalla, 1992) نشان می‌دهد که اگر میزان بخار آب در ستونی از هوا از ۱ سانتیمتر آب به ۴ سانتیمتر آب برسد، متوسط روزانه تابش خورشیدی در آسمان صاف به میزان ۵/۶ درصد کاهش می‌یابد. گارج و گارج (۱۹۸۲) رابطه (۸) را برای محاسبه تابش ارائه کردند.

$$R_s = R_a \left( X + Y \left( \frac{n}{N} \right) + Z W_{at} \right) \quad (8)$$

در این رابطه  $W_{at}$  میزان بخار آب در واحد حجم هوا و  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  ضرایب معادله می‌باشند.  $W_{at}$  از رابطه ۹ به دست می‌آید (Hussain, 1984):

$$W_{at} = RH(4.7923 + 0.3647T_a + 0.0055T_a^2 + 0.0003T_a^3) \quad (9)$$

که در این معادله  $T_a$  دمای هوا (درجه سلسیوس) در ۲ متری سطح زمین و  $RH$  رطوبت نسبی بر حسب اعشار (0-1) می‌باشد.

در این معادله نیز می‌توان ضرایب  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  را با استفاده از روش حداقل مربعات خطا مانند آن چه در مورد معادله آنگستروم- پرسکات گفته شد، محاسبه نمود. در این حالت رابطه (۴) به شکل رابطه (۱۰) خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} R_{s(1)} \\ R_{s(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{s(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{a(1)} & (n/N)R_{a(1)} & W_{at(1)} \\ R_{a(2)} & (n/N)R_{a(2)} & W_{at(2)} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ R_{a(n)} & (n/N)R_{a(n)} & W_{at(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{(1)} \\ e_{(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e_{(n)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

## توسعه دو مدل جدید براساس ابرناکی

همان طور که ذکر شد، بعضی از معادلات تابش ارائه شده براساس ابرناکی محاسبه شده‌اند. لذا در این مطالعه، بر مبنای داده‌های ابرناکی موجود دو مدل جدید تابش توسعه

$$j = \sum_{i=1}^n e^{2(i)} \quad (5)$$

$$k = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$k = \text{Pinv}(X)Y = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

در این رابطه

$$X = \begin{bmatrix} R_{a(1)} & (n/N)R_{a(1)} \\ R_{a(2)} & (n/N)R_{a(2)} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ R_{a(n)} & (n/N)R_{a(n)} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} R_{s(1)} \\ R_{s(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{s(n)} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad X^T \text{ ماتریس ترانپاده} \quad X$$

می‌باشد. اگر برای ماتریس  $k$  یعنی ضرایب  $a$ ،  $b$  مقادیر مناسبی حاصل نشود، نشان‌دهنده خطای مربوط به داده‌ها است. چون مطابق قضیه گاس- مارکوو این ضرایب بهینه بوده و بهتر از آن را نمی‌توان به دست آورد.

برای محاسبه ضرایب فوق در هر دو معادله ذکر شده از محیط برنامه‌نویسی MATLAB استفاده شد. به این ترتیب از داده‌های سال‌های ۱۹۹۴-۲۰۰۰ برای واسنجی معادلات و سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۳ جهت اعتبارسنجی آن‌ها استفاده شد.

## نتایج و بحث

### (۱) معادلات واسنجی شده

#### الف) مدل تابش آنگستروم- پرسکات

براساس داده‌های موجود سال‌های ۱۹۹۴-۲۰۰۰ ضرایب معادله آنگستروم- پرسکات برابر  $a=0.25$  و  $b=0.42$  به دست آمد. بنابراین می‌توان این معادله را به صورت زیر نوشت:

$$R_s = R_a \left(0.25 + 0.42 \frac{n}{N}\right) \quad (۱۶)$$

ملاحظه می‌شود که مقدار  $a$  دقیقاً برابر مقدار آن چه آنگستروم پیشنهاد داده است می‌باشد. شکل (۱) تطابق مقادیر تابش اندازه‌گیری و برآورد شده را به ترتیب در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی معادله نشان می‌دهد.

همچنین جدول (۱) نتایج تحلیل آماری این معادله را نشان می‌دهد. طبق نمودارهای نشان داده شده و پارامترهای آماری مشاهده می‌شود که می‌توان ضرایب فوق را قابل قبول دانست. ضریب تبیین نزدیک به ۸۷ و ۸۹ درصد به ترتیب در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی و نیز مقادیر پایین RMSE (به ترتیب ۲/۴۶ و ۵/۱۵) و MBE (به ترتیب ۰/۱۴ و -۴/۶۳) این مسئله را تأیید می‌کند. البته بدیهی است که با توجه به مقدار RMSE و MBE، خطا در مرحله اعتبارسنجی بیشتر از مرحله واسنجی باشد. چرا که معادلات فوق در محدوده داده‌های مرحله واسنجی به دست آمده و در همان محدوده از بالاترین اعتبار برخوردار است.

یافت. این دو مدل به طور کلی به شکل روابط (۱۱) و (۱۲) می‌باشند:

$$R_s = R_a (AN^2 + BN + C) \quad (۱۱)$$

$$R_s = R_a \left(1 - Ke^{M\left(\frac{N}{8}\right)}\right) \quad (۱۲)$$

در این معادلات  $N$  ابرناکی بر مبنای سیستم هشت تایی  $A, B, C, K$  و  $M$  ضرایب ثابت مربوط به منطقه مورد مطالعه در هر مدل می‌باشند. برای توسعه این دو مدل از داده‌های ۱۹۹۴-۲۰۰۰ استفاده شد. داده‌های سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۳ نیز برای اعتبارسنجی و تأیید مدل‌های ذکر شده مورد استفاده قرار گرفت.

### معیارهای آماری واسنجی (شاخص‌های خطا سنجی)

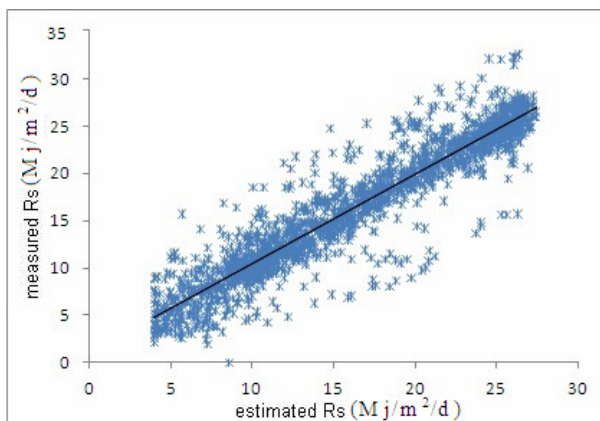
در این تحقیق برای ارزیابی دقت مدل‌ها و مقایسه نسبی نتایج مدل‌های تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری شده تابش رسیده به سطح زمین توسط پیرانومتر، آزمون‌هایی که توسط جاکوویدز (Jacovides, 1997) پیشنهاد شده است، انجام شد. او نشان داد که استفاده از شاخص‌های  $RMSE^1$ ،  $MBE^2$  به تنهایی، موجب به وجود آمدن خطا در انتخاب بهترین مدل می‌شود. لذا توصیه نمود که در کنار این دو شاخص، از معیار  $t$  که ترکیبی از آن‌ها است نیز، استفاده شود. شاخص‌های گفته شده به صورت زیر می‌باشند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۱۳)$$

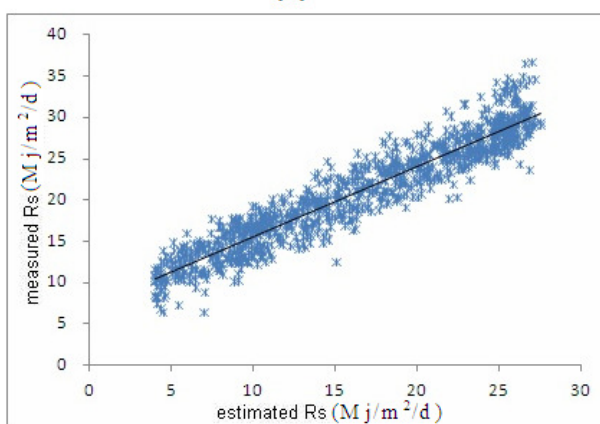
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (۱۴)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (۱۵)$$

در این معادلات  $P_i$  مقدار برآورد شده میزان تابش خورشیدی،  $O_i$  مقدار اندازه‌گیری شده میزان تابش خورشیدی و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد.



(a)



(b)

شکل شماره ۱- همبستگی مقادیر تابش اندازه‌گیری شده با تابش تخمین زده شده مدل آنگستروم (a) مرحله واسنجی و (b) مرحله اعتبارسنجی

جدول شماره ۱- شاخص‌های آماری محاسبه شده در مدل آنگستروم

t	MBE	RMSE	R <sup>2</sup>	
۲/۳۶۱	-۰/۱۳۶۸	۲/۴۶۴۸	۰/۸۷۴۹	واسنجی
۶/۱۷	-۴/۶۲۸۴	۵/۱۴۹۵	۰/۸۹۸۳	اعتبارسنجی

بر معادله آنگستروم اثر خواهد داشت. شکل (۲) و نیز جدول (۲) نتایج حاصل را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب تبیین (به ترتیب ۸۷ و ۸۹ درصد)، RMSE (به ترتیب ۲/۴۵ و ۵/۰۸) و MBE (به ترتیب -۰/۱۱ و -۴/۵۶) نشان می‌دهد که ضرایب معادله از ضریب اطمینان مناسبی برخوردار می‌باشد. همچنین مقایسه جدول (۱) و (۲) نشان می‌دهد که دقت هر دو روش در حد یکسانی است. در هر دو روش ملاحظه می‌شود که مقدار t در مرحله اعتبارسنجی

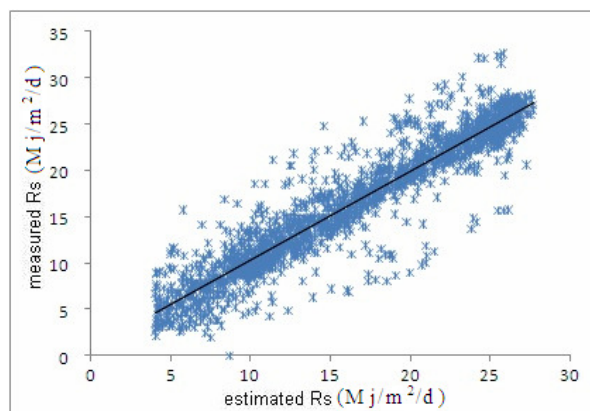
### ب) معادله گارج- گارج

ضرایب معادله گارج- گارج بر طبق داده‌های سال‌های ۱۹۹۴-۲۰۰۰ به صورت زیر به دست آمد:

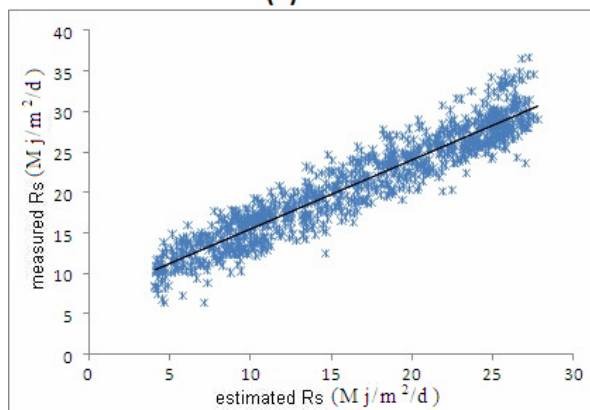
$$R_s = R_a \left( 0.27 + 0.43 \left( \frac{n}{N} \right) - 0.0028 W_{at} \right) \quad (17)$$

در معادله فوق ملاحظه می‌شود که به خاطر مقدار کم ضریب Z همچنان ساعات آفتابی بیشترین تاثیر را بر مقدار تابش دریافتی دارد. اما به هر حال میزان بخار موجود در جو

بسیار زیاد است که این مقدار نشان می‌دهد که ترکیب دو پارامتر RMSE و MBE میزان خطا را در این مرحله افزایش می‌دهد.



(a)



(b)

شکل شماره ۲- همبستگی مقادیر تابش اندازه گیری شده با تابش تخمین زده شده مدل گارج-گارج (a) در مرحله واسنجی و (b) در مرحله اعتبارسنجی

جدول شماره ۲- شاخص‌های آماری محاسبه شده در مدل گارج-گارج

t	MBE	RMSE	R <sup>2</sup>	
۱/۸۵۸۹	-۰/۱۰۷۳	۲/۴۵۵۳	۰/۸۷۴۸	واسنجی
۵/۴۶	-۴/۵۵۶۳	۵/۰۸۰۱	۰/۸۹۸۲	اعتبارسنجی

ارائه شده است. بنابراین در این مطالعه دو مدل متفاوت براساس این پارامتر ارائه شد. معادله اول معادله‌ای چند جمله‌ای براساس توان‌های متفاوت ابرناکی می‌باشد که براساس داده‌های ۱۹۹۴-۲۰۰۰ به صورت زیر حاصل شده است:

$$R_s = R_a(-0.0056N^2 - 0.0157N + 0.7079) \quad (۱۸)$$

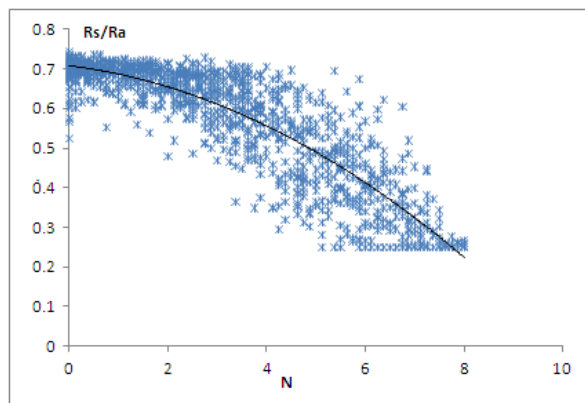
## معادلات تولید شده

### الف) معادله شماره ۱

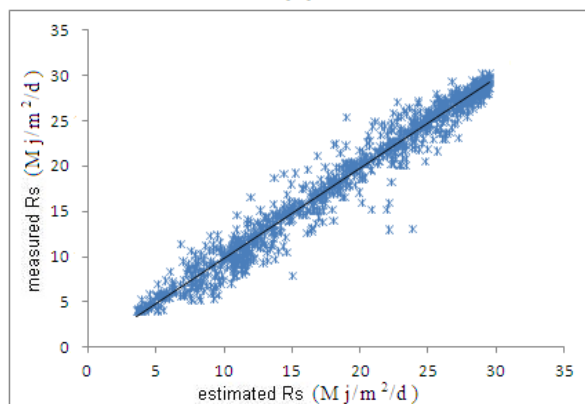
همان طور که ذکر شد یکی از پارامترهای مهم برای تعیین میزان تابش رسیده به سطح زمین، مقدار ابرناکی می‌باشد و بنابراین معادلات زیادی براین مبنا پایه‌ریزی و



شکل (۳) نحوه ارتباط پارامترهای  $R_s/R_a$  و  $N$  و نحوه به دست آمدن معادله مربوطه را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه مقادیر برآورد شده  $R_s$  توسط معادله با اندازه‌گیری شده در این شکل ملاحظه می‌شود. ضریب تبیین معادله به دست آمده برابر ۸۴ درصد می‌باشد.



(a)



(b)

شکل شماره ۳- نحوه تعیین مدل شماره ۱ (a) و اعتبارسنجی آن (b)

$$\frac{R_a - R_s}{R_a} = 0.2803e^{0.9527(\frac{N}{8})} \quad (20)$$

و پس از مرتب کردن معادله خواهیم داشت:

$$R_s = R_a(1 - 0.2803e^{0.9527(\frac{N}{8})}) \quad (21)$$

شکل (۴) نتایج مربوط به توسعه معادله و نیز اعتبارسنجی آن را نشان می‌دهد. در این معادله ضریب تبیین برابر ۸۲ درصد می‌باشد.

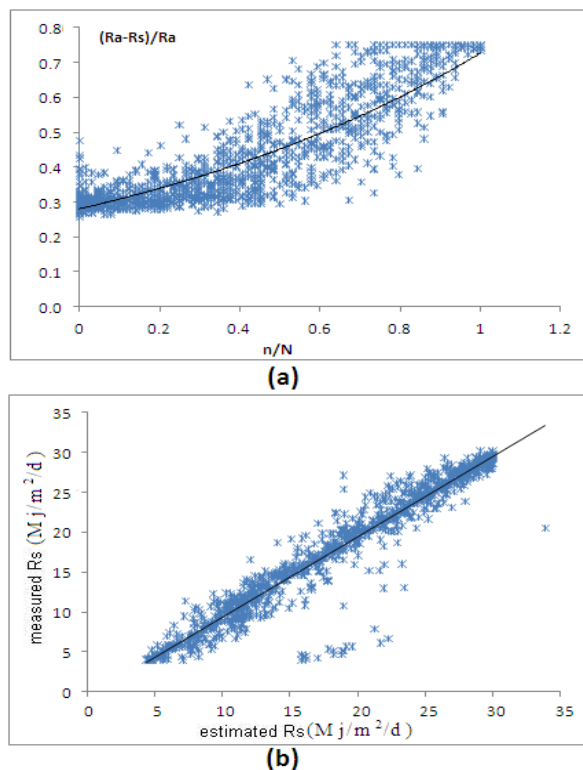
ب) معادله شماره ۲

معادله ۱۲ را می‌توان به شکل معادله (۱۹) نشان داد:

$$\frac{R_a - R_s}{R_a} = Ke^{M(\frac{N}{8})} \quad (19)$$

بنابراین اگر مقدار  $\frac{R_a - R_s}{R_a}$  را در برابر  $\frac{N}{8}$  رسم

کنیم می‌توانیم برای معادله نمایی فوق ضرایب  $M$  و  $K$  را به دست آوریم. به این ترتیب معادله (۱۹) به صورت رابطه (۲۰) به دست خواهد آمد:



شکل شماره ۴- نحوه تعیین مدل شماره ۲ (a) و اعتبارسنجی آن (b)

در دو انتهای نمودارهای شکل (۳) و (۴) در مرحله واسنجی می‌تواند نشان دهنده عدم دقت قابل قبول در اندازه‌گیری داده‌های میدانی و یا عدم واسنجی دستگاه‌های پیرانومتر باشد که توصیه می‌شود، اداره هواشناسی این مسئله را مورد بررسی قرار دهد.

جدول (۳) شاخص‌های آماری اعتبارسنجی دو مدل توسعه یافته را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که این دو مدل نسبت به مدل‌های واسنجی شده آنگستروم- پرسکات و گارج- گارج از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین مدل (۱) نسبت به مدل (۲) از دقت بیشتری برخوردار است. البته مقادیر بالای  $t$  در این دو مدل و نیز حالت ثبات

جدول شماره ۳- شاخص‌های آماری اعتبارسنجی دو مدل توسعه یافته

t	MBE	RMSE	R <sup>2</sup>	
۵/۴۸۹۳	۰/۲۵۰۴	۱/۴۹۲۷	۰/۹۶۳۶	مدل ۱
۹/۳۵۰۴	۰/۶۶	۲/۳۷۶۷	۰/۹۱۵۳	مدل ۲

### نتیجه‌گیری

آنگستروم- پرسکات به دلیل نیاز به داده‌های هواشناسی کمتر نسبت به معادله گارج - گارج توصیه می‌شود. از بین مدل‌های توسعه یافته در این مطالعه، معادله (۱) نسبت به معادله (۲) از دقت بالاتری برخوردار است. از

علیرغم اثر بخار آب موجود در جو بر میزان تابش ورودی و نیز بهتر بودن نتایج حاصل از معادله آنگستروم- پرسکات، ملاحظه شد که تفاوت زیادی میان این معادله و معادله گارج- گارج وجود ندارد. لذا استفاده از معادله

7. Elagib, N. A., Sh. F. Babiker and Sh. H. Alvi, 1998, New empirical models for global solar radiation over Bahrain, *Energy Conversion and Management, Mgmt*, No. 39, Vol. 8, pp. 827-835.
8. Garg, H. P. and S. T. Garg, 1982, Prediction of global solar radiation from bright sunshine hours and other meteorological parameters. *Solar-India, Proceedings of the National Solar Energy convention*. Allied Publishers, New Delhi, pp. 1.004–1.007.
9. Hussain, M., 1984, Estimation of global and diffuse irradiation from sunshine duration and atmospheric water vapour content. *Solar Energy*, No. 33, pp. 217–220.
10. Iziomon, M. G. and H. Mayer, 2002, Assessment of some global solar radiation parameterizations, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, No. 64, pp. 1631–1643.
11. Jacovides, C. P., 1997, Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models, *Agricultural water management*, No. 3, pp. 95-97.
12. Khalili, A. and H. Rezai-e sadr, 1997, Estimation of global solar radiation over Iran based on climatical data, *Geographical Researches*, No. 46, pp. 15-35.
13. Lopez, G., M. A. Rubio, and F. J. Batlles, 2000, Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain, *Renewable Energy*, No. 21, pp. 175-186.
14. Plackett, R. L., 1950, Some theorems in least squares, *Biometrika*, No. 37, pp. 149-157.
15. Prescott, J. A., 1940, Evaporation from water surface in relation to solar radiation, *Trans. Roy. Soc. Austr*, No. 64, pp. 114–125.
16. Rehman, Sh., 1998, Solar radiation over Saudi Arabia and comparisons with empirical

طرفی با توجه به این که مدل‌های توسعه یافته نسبت به مدل‌های آنگستروم- پرسکات و گارج -گارج از دقت بالاتری برخوردار هستند و نیز با در نظر گرفتن این نکته که مدل آنگستروم- پرسکات جهت محاسبه تابش نیاز به دو پارامتر دارد و از این دو پارامتر مقدار  $N$  نیز با محاسبات به دست می‌آید که ممکن است برای منطقه مورد نظر دقیق نباشد، لذا به طور کلی استفاده از مدل (۱) توسعه یافته در این مطالعه که تنها پارامتر ابرناکی در آن استفاده شده است، توصیه می‌شود.

### منابع

1. Alizadeh, A. and N. Khalili, 2009, Estimation of Angstrom Coefficient and Developing a regression equation for solar radiation estimation (case study: Mashhad), *Journal of Water and Soil*, No. 1, Vol. 23, pp. 229-238.
2. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998, *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 56, Rome.
3. Almorox, J., M. Benito and C. Hontoria, 2005, Estimation of monthly Angstrom-Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain, *Renewable Energy*, No. 30, pp. 931–936.
4. Angstrom, A., 1924, Solar and terrestrial radiation, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc*, No. 50, pp. 121–125.
5. Bristow, K. L. and G. S. Campbell, 1984, On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature, *Agric. Forest. Meteorol*, No 31, pp. 159–166.
6. Ehnberg, J. S. G. and M. H. J. Bollen, 2005, Simulation of global solar radiation based on cloud observations, *Solar Energy*, No. 78, pp. 157–162.

- models, Energy, No. 23, Vol. 12, pp. 1077–1082.
17. Sabziparvar, A. A. and H. Shetaee, 2007, Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran, Energy, No. 32, pp. 649–655.
18. Skeiker, K., 2006, Correlation of global solar radiation with common geographical and meteorological parameters for Damascus province, Syria, Energy Conversion and Management, Mgmt, No. 47, pp. 331-345.
19. Sozne, A., 2005, Solar energy potential in Turkey, Applied Energy, No. 80, pp. 367-381.
20. Tamm, E. and E. Thormalla, 1992, Handbook of Helionda: a program to simulate the effects of Meteorology, Place and Time. Julich, BMFT-Forschungsprojekt 0328932A.
21. Togrul, I. T. and E. Onat, 1999, A study for estimating solar radiation in Elazig using geographical and meteorological data, Energy Conversion & Management, No. 40, pp. 1577-1584.
22. Yang, K., T. Koike and B. Ye, 2006, Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets, Agricultural and Forest Meteorology, No. 137, pp. 43–55.