

واسنجی ضرایب رابطه آنگستروم- پرسکات در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی

غلامعباس فلاح قاهری^{۱*}، فهیمه شاکری^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۳

۱- استادیار اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

۲- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی شهری، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ab_fa789@yahoo.com

چکیده

میزان تابش کل خورشیدی رسیده به سطح زمین، یکی از مهم‌ترین پارامترها در توازن گرمایی سیستم زمین-جو محسوب می‌شود. در تحقیق حاضر از رابطه‌های بلک و آلن به ترتیب برای تخمین تابش کل خورشیدی روزانه رسیده به سطح زمین و لایه بالایی جو استفاده شد. مقادیر تابش برآوردشده در سطح زمین توسط رابطه بلک با داده‌های پیرانومتر ایستگاه مشهد مقایسه شد. نتایج نشان داد که بین مقادیر تابش اندازه‌گیری‌شده با پیرانومتر و مقادیر تابش برآوردشده توسط رابطه بلک اختلاف کمی وجود دارد. سپس ضرایب رابطه آنگستروم- پرسکات در ایستگاه مشهد واسنجی و نتایج آن بر اساس معیارهای مختلف آماری، با مدل‌های آنگستروم- پرسکات که در تحقیقات قبلی برای ایستگاه مشهد پیشنهاد شده بود، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد مدل تدوین شده در این مطالعه از دقت بالاتری برخوردار است. ریشه میانگین مربعات خطا برای مدل پیشنهادی توسط نگارندگان، علیزاده و خلیلی و فائو به ترتیب معادل ۴/۵۷، ۴/۶۱ و ۵/۰۲ مگاژول بر مترمربع بر روز به دست آمد. سپس با در دست داشتن مقادیر تابش به-دست آمده توسط رابطه بلک و آلن، ضرایب رابطه آنگستروم- پرسکات در دیگر ایستگاه‌های استان خراسان رضوی نیز واسنجی گردید. در نهایت، مقادیر تابش به دست آمده بر روی یک سطح افقی در روی زمین با استفاده از روش کریجینگ معمولی پهنه‌بندی شد. نتایج حاصل از پهنه‌بندی تابش نشان داد مناطق جنوبی استان از نظر دریافت تابش خورشیدی، پتانسیل بیشتری دارند.

واژه‌های کلیدی: تابش، رابطه آلن، رابطه آنگستروم- پرسکات، رابطه بلک، روش کریجینگ معمولی

Calibration of Angstrom- Prescott Coefficients for Selected Stations of Khorasan-e Razavi Province

Q. Fallah Ghalhari^{1*}, F. Shakeri²

Received: 20 January 2015 Accepted: 3 July 2016

1- Assist. Prof., Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Iran

2- PhD Student of Urban Climatology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Iran

* Corresponding Author, Email: ab_fa789@yahoo.com

Abstract

The solar radiation reached to the Earth surface is an important parameter in thermal balance of the Earth- Atmosphere system. In this study, the Black and Allen models were used for estimating daily global solar radiation reached to the Earth surface and the atmosphere upper layer, respectively. The estimated radiation at ground level by Black model was compared with the Pyranometer data at Mashhad station. The results showed that there was little difference between the amount of radiation measured with Pyranometer and the estimated one by the Black model. Then the coefficients of Angstrom- Prescott model for Mashhad station, was calibrated. In the next stage, the obtained results were compared with the Angstrom- Prescott models that had been proposed in previous researches for Mashhad station. The results showed that the developed model in this study had a high accuracy. Root mean squared error values for the model proposed here by authors, Alizadeh and Khalili and FAO were obtained 4.57, 4.61 and 5.02 MJ M⁻² day⁻¹, respectively. Then, the Angstrom- Prescott coefficients at other stations of Khorasan Razavi Province were calibrated using values obtained by the Black and Allen relations. Finally, the obtained radiation values on a horizontal surface on ground level using ordinary Kriging were mapped. The results of the mapping of radiation showed that the southern areas of the province had more potential from the view of receiving solar radiation.

Keywords: Allen relation, Angstrom- Prescott relation, Black relation, Ordinary Kriging method, Radiation

مقدمه

و گرمای تابش شده توسط سطح زمین، دمای هوا را افزایش می‌دهد. گرمای هوا، انرژی را به گیاهان منتقل می‌کند و نرخ تبخیر تعرق را کنترل می‌نماید. تبخیر تعرق توسط پارامترهای هواشناسی نظیر تابش خورشیدی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تغییرات کوچک در تابش خورشیدی ممکن است اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی مقدار محاسبه شده تبخیر تعرق گیاه مرجع داشته باشد (لیاسات و اشنایدر ۱۹۹۸). تبخیر تعرق یک مؤلفه

تابش کل خورشیدی رسیده به سطح زمین (R_s) از پارامترهای مهم در توازن حرارتی سیستم جو - زمین است. همچنین یکی از عناصر هواشناسی است که فرایندهای مختلفی نظیر تبخیر تعرق، ذوب برف و رشد گیاهان را کنترل می‌نماید و در مهندسی انرژی، هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و سایر علوم کاربرد دارد. تابش خورشیدی جذب شده به وسیله جو

کلیدی برای اکوسیستم‌های زمینی است. دانستن مقدار دقیق آب مورد نیاز گیاهان مختلف در یک منطقه با شرایط اقلیمی مشخص، برای برنامه‌ریزی‌های آبیاری و مدیریت سیستم‌های آبیاری ضروری است (بی‌نام ۲۰۰۳). یکی از دقیق‌ترین روش‌های اندازه‌گیری تابش کل خورشیدی در ایستگاه‌های هواشناسی، استفاده از پیرانومتر است اما به علت کمبود امکانات، اندازه‌گیری آن در تعداد محدودی از ایستگاه‌های سینوپتیک امکان پذیر است. در نتیجه، محققان برای برآورد آن تلاش می‌کنند (بلچر و دیگاتانو ۲۰۰۷). در مطالعه تابش خورشیدی نمی‌توان تمامی عناصر مؤثر را در معادلات وارد نمود؛ در نتیجه برای تخمین میزان تابش کل خورشیدی از تعداد محدودی پارامترهای اقلیمی استفاده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که ساعات آفتابی مهم‌ترین عامل مشخص‌کننده میزان تابش کل خورشیدی است (علیزاده و خلیلی ۱۳۸۸). نخستین بار، آنگستروم با به‌کارگیری داده‌های هواشناسی (ساعات آفتابی) توانست مدل ساده‌ای برای تخمین مقدار تابش کل خورشیدی رسیده به سطح زمین (R_s) در یک سطح افقی ارائه نماید (آنگستروم ۱۹۲۴). یکی از کاربردهای رابطه آنگستروم- پرسکات، تخمین تابش طول موج کوتاه ورودی به سطح زمین است که در محاسبه تبخیر تعرق گیاه مرجع به‌عنوان ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل آنگستروم در سال ۱۹۴۰ مجدداً اصلاح شد (پرسکات ۱۹۴۰). برخی از محققان برای افزایش دقت مدل برآورد تابش، مؤلفه‌های تابش مستقیم و پراکنده خورشید را به‌طور مجزا محاسبه نمودند. در یکی از این تحقیقات با استفاده از یک مدل ساده، مقادیر روزانه تابش مستقیم و پراکنده، با استفاده از نسبت n/N (n و N به ترتیب معرف ساعات آفتابی واقعی و بیشینه ساعات آفتابی ممکن است) ضریب ابر و زاویه سمت الرأس^۱ خورشید محاسبه شد (پالتریج و پراکتر ۱۹۷۶). پرساد و همکاران (۱۹۹۷)

ضرایب رابطه آنگستروم- پرسکات را برای تخمین تابش کلی در بتسوانا و نیجر تخمین زدند. تعدادی از مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در کشور مصر توسط روبآ (۲۰۰۹) مورد ارزیابی قرار گرفت. ایشان با مقایسه نتایج حاصل از کاربرد ۱۰ مدل تخمین تابش و مقادیر مشاهده شده در ۱۹ ایستگاه هواشناسی واقع در نقاط مختلف مصر نتیجه گرفت که مدل تعدیل شده روبآ (۲۰۰۹) کمترین خطا را در بین مدل‌ها دارد. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های ۸۰ ایستگاه هواشناسی در سه منطقه اقلیم کشاورزی در چین، تأثیر متغیرهای مختلف را بر پارامترهای رابطه آنگستروم- پرسکات ارزیابی نموده‌اند. نتایج نشان داد پارامتر a تحت تأثیر مقدار بارندگی سالانه، ارتفاع محل، میانگین دمای روزانه، n/N طول و عرض جغرافیایی است، در حالی‌که پارامتر b فقط متأثر از ارتفاع محل است. از دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات یانگ و همکاران (۲۰۰۶)، المورکس و همکاران (۲۰۱۱)، صفایی و همکاران (۱۳۸۴)، موسوی بایگی و همکاران (۱۳۸۹)، معینی و همکاران (۱۳۸۹)، نادی و همکاران (۱۳۸۹)، آفاشریعتمداری و همکاران (۱۳۹۰)، اشاره نمود. با توجه به اینکه نتایج حاصل از مدل‌های تابش خورشیدی در طرح‌های مربوط به منابع آب و کشاورزی کاربرد فراوانی دارد، همواره برآورد آن مورد توجه محققان مختلف به‌ویژه متخصصین علوم آب و خاک قرار گرفته است. هدف اصلی این تحقیق نیز توسعه و واسنجی ضرایب رابطه آنگستروم برای تخمین تابش رسیده به سطح زمین در استان خراسان رضوی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش استان خراسان رضوی واقع در طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض جغرافیایی

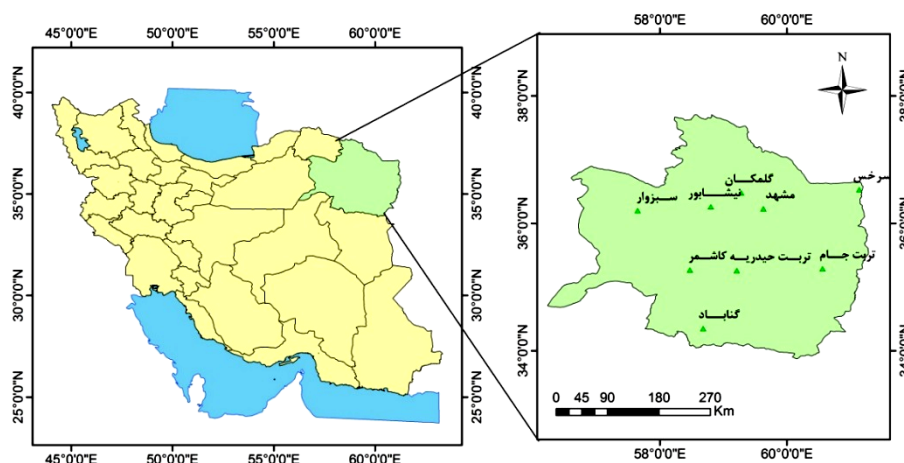
1- Zenith angle

روزانه ایستگاه‌های هواشناسی همدید استان در دوره آماری بیست ساله (۲۰۱۲-۱۹۹۳) مورد استفاده قرار گرفت.

شمالی است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه را به همراه ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد.

روش تحقیق

برای برآورد تابش کلی خورشیدی رسیده به واحد سطح افقی در استان خراسان رضوی، آمار



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های منتخب.

سطح زمین و سقف جو است. در این تحقیق برای محاسبه تابش دریافت شده در نقاط فاقد اطلاعات پیرانومتر، از رابطه بلک^۱ استفاده شد. لازم به ذکر است دقت نتایج به دست آمده از رابطه بلک، با داده‌های اندازه‌گیری شده تابش که در ایستگاه همدید مشهد در همان دوره آماری تحقیق اندازه‌گیری شده بود، مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس به دلیل موفقیت‌آمیز بودن این روش در تخمین تابش دریافت‌شده در سطح زمین، از این رابطه برای تخمین تابش رسیده به سطح زمین در نقاط فاقد اطلاعات پیرانومتر استفاده شد. در این تحقیق برای محاسبه تابش فرازمینی در لایه بالایی جو (R_{S0})، از رابطه ارائه شده توسط آلن و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شد. در ادامه پس از محاسبه تابش دریافت‌شده در سقف جو و سطح زمین و با در دست داشتن اطلاعات مربوط به ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده و ساعات آفتابی ممکن در هر ایستگاه، از روش

داده‌های مورد نیاز این تحقیق شامل میانگین ساعات آفتابی، تابش (بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز) و ابرناکی (بر حسب دهم آسمان) است که از بخش آمار و اطلاعات سازمان هواشناسی کشور تهیه شد.

پس از بررسی داده‌های آماری ملاحظه شد که بعضی از روزها فاقد اطلاعات می‌باشند، به همین دلیل این روزها از مجموعه داده‌ها حذف گردید. از طرفی تحلیل‌های آماری با استفاده از نمودار جعبه‌ای نشان داد بعضی از روزها دارای داده‌های پرت می‌باشند؛ بنابراین روزهای مذکور نیز از مجموعه داده‌ها کنار گذاشته شدند. از کل روزهای موجود در دوره آماری یعنی تعداد ۷۳۰۵ روز (با احتساب سال‌های کبیسه)، تعداد ۵۷۱۱ روز دارای آمار کامل بودند. به عبارت دیگر جمعاً ۷۸ درصد از روزها که دارای اطلاعات کامل بودند، وارد تحلیل‌های بعدی شدند. برای واسنجی روابط آنگستروم، نیاز به دانستن تابش دریافت شده در

مترمربع محاسبه و به واحد مگاژول بر مترمربع بر روز تبدیل شد:

$$R_{S0} = \frac{I_o}{\pi} \cdot \left(\frac{d_m}{d}\right)^2 \cdot [h_o \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta_s) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta_s) \cdot \sin(h_o)] \quad [2]$$

در معادله فوق، ϕ عرض جغرافیایی محل، $I_o = 1368 \text{ W.m}^{-2}$ میانگین ثابت خورشیدی، $d_m = 149.6 \times 10^9 \text{ m}$ میانگین فاصله زمین از خورشید، h_o زاویه ساعتی (بر حسب رادیان)، d فاصله واقعی برای هر روز سال و R_{S0} تابش فرازمینی (بر حسب وات بر مترمربع) است. چگالی شار تابش کل خورشیدی در سطح زمین (R_s) ممکن است نسبت به مقادیر متناظر آن در سقف جو (R_{S0}) به طور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر باشد که دلیل آن تخلیه تابش کل خورشیدی در گذر از میان جو است. ابری بودن آسمان بسته به اینکه در چه موقعی از روز اتفاق بیفتد، بر مقدار R_s تأثیر می‌گذارد. ابری بودن آسمان در ابتدا و انتهای روز از مقدار ساعات اندازه‌گیری شده آفتابی می‌کاهد. بزرگترین تأثیر متعلق به ابرها مخصوصاً ابرهای استراتوس پایین است. در زمان حاضر بودن ابرهای پراکنده، R_s ورودی به طور زیادی تغییر می‌کند. زاویه ساعتی h_o در هنگام طلوع و غروب خورشید بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\cos(h_o) = -\tan(\phi) \cdot \tan(\delta_s) \quad [3]$$

در معادله فوق، زاویه ساعتی خورشید بر حسب رادیان است. زاویه میل خورشیدی δ_s برای هر روز سال توسط رابطه ۴ بیان می‌شود:

$$\delta_s = \Phi_r \cdot \cos\left[\frac{C(D - D_r)}{D_y}\right] \quad [4]$$

گرافیکی برای تعیین ضرایب a و b رابطه آنگستروم در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. واسنجی ضرایب a و b با برقراری رگرسیون خطی بین $\frac{R_s}{R_{S0}}$ و $\frac{n}{N}$ به دست می‌آید. همان‌طور که بیان شد، هدف اصلی این تحقیق، واسنجی ضرایب رابطه کلاسیک آنگستروم در منطقه مورد مطالعه است. بدین منظور روش‌های تجربی پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف برای برآورد تابش کل خورشیدی در استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آنها با شاخص‌های خطاسنجی گوناگون مورد بررسی آماری قرار گرفت تا مناسب‌ترین معادله برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر در این منطقه تعیین شود. این مدل‌ها در بخش‌های بعدی به اختصار توضیح داده می‌شود. سپس مقادیر تابش به دست آمده بر روی یک سطح افقی در سطح زمین با استفاده از روش کریجینگ معمولی در نرم افزار Arc GIS پهنه‌بندی شد.

مدل‌های برآورد تابش کلی خورشیدی رابطه بلک

یکی از روابطی که برای محاسبه مقدار تابش رسیده به سطح افقی مورد استفاده قرار می‌گیرد، رابطه بلک است. در این مطالعه برای برآورد مقدار تابش کل دریافتی در سطح افقی (R_s) بر حسب میزان ابرناکی، از این رابطه که به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود، استفاده شده است (رزنبرگ و همکاران ۱۹۸۳):

$$\frac{R_s}{R_{S0}} = 0.803 - 0.34 C - 0.458 C^2 \quad [1]$$

در رابطه فوق، C میانگین ابرناکی ماهانه (بر حسب دهم آسمان)، R_s تابش رسیده به سطح زمین (بر حسب وات بر مترمربع) و R_{S0} مقدار نظری تابش رسیده به سقف جو (بر حسب وات بر مترمربع) می‌باشد.

در این تحقیق، مقادیر تابش دریافت شده در سقف جو (تابش‌های فرازمینی) از رابطه ارائه شده توسط آلن و همکاران (رابطه ۲) بر حسب واحد وات بر

سال، نسبت ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده به بیشینه ساعات آفتابی روزانه و شرایط اقلیمی منطقه بستگی دارد (صفایی و همکاران ۱۳۸۴).

مدل آنگستروم-پرسکات پیشنهادی توسط فائو رابطه آنگستروم-پرسکات پیشنهاد شده توسط فائو به صورت رابطه ۷ می‌باشد (آلن و همکاران ۱۹۹۸):

$$R_s = R_{s0} \left(0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) \quad [V]$$

که در آن R_s تابش کل خورشیدی رسیده به سطح زمین (مگاژول بر مترمربع بر روز)، R_{s0} تابش رسیده به سقف جو (مگاژول بر مترمربع بر روز)، n ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده و N ساعات آفتابی ممکن است.

مدل آنگستروم-پرسکات پیشنهاد شده توسط علیزاده و خلیلی

رابطه آنگستروم-پرسکات پیشنهاد شده توسط علیزاده و خلیلی (۱۳۸۸) برای ایستگاه مشهد به صورت رابطه ۸ می‌باشد:

$$R_s = R_{s0} \left(0.23 + 0.44 \frac{n}{N} \right) \quad [A]$$

شاخص‌های خطاسنجی

در این تحقیق برای ارزیابی دقت مدل‌ها و مقایسه نسبی نتایج مدل‌های تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری شده تابش رسیده به سطح زمین توسط پیرانومتر، از معیارهای ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا^۲ ($RMSE$) و میانگین خطای اریب^۳ (MBE) استفاده شد. جاکوویچ (۱۹۹۷) نشان داد که استفاده از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب به تنهایی، سبب ایجاد خطا در انتخاب بهترین مدل می‌شود. بنابراین توصیه نمود که در کنار این دو شاخص، از معیار t نیز که ترکیبی از

در معادله فوق، $\Phi_r = 23.45^\circ = 0.409 \text{ rad}$ ، شماره روز ژولیوسی، $C = 360^\circ = 2\pi \text{ rad}$ ، شماره روز ژولیوسی انقلاب تابستانی^۱ و $D_r = 173$ شماره روزهای سال است. برای سال- $D_y = 365.2$ شماره روزهای سال است. این معادله تقریبی است، چون فرض می‌کند مدار زمین نسبت به صفحه دایره البروج^۲، دایره‌ای شکل است. بیشینه مقدار ساعات آفتابی ممکن (N)، به زمان سال و عرض جغرافیایی بستگی دارد و از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$N = \frac{2}{15} h_0 \quad [5]$$

در معادله فوق، h_0 زاویه ساعتی (بر حسب درجه) در هنگام غروب خورشید است (فلاح قاله‌ری ۱۳۹۳).

مدل آنگستروم-پرسکات

رابطه مطالعاتی آنگستروم-پرسکات به صورت رابطه ۶ می‌باشد (آنگستروم ۱۹۲۴؛ پرسکات ۱۹۴۰):

$$\frac{R_s}{R_{s0}} = a + b \frac{n}{N} \quad [6]$$

در رابطه فوق، R_s و R_{s0} به ترتیب تابش کلی دریافتی از خورشید بر سطح افقی در سطح زمین و تابش کلی دریافتی از خورشید در سطح افقی در بالای جو (تابش فرامینی) بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز، N بیشینه ممکن ساعات آفتابی روزانه بر حسب ساعت، n ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده روزانه بر حسب ساعت و a و b ، ضرایب تجربی ثابت می‌باشند که برای هر منطقه باید مشخص شوند. یکی از اهداف این مقاله نیز یافتن ضرایب a و b است. به عنوان نمونه، این ضرایب برای آمریکا $a = 0.35$ و $b = 0.71$ و در فرانسه $a = 0.24$ و $b = 0.46$ می‌باشد (روزنبرگ و همکاران ۱۹۸۳). این دو ضریب به برخی از پارامترها، از جمله عرض جغرافیایی، ارتفاع محل از سطح دریا، فصول

^۲-Root mean square error

^۳- Mean bias error

1- Summer solstice

2- Ecliptic plane

خورشیدی، \bar{p} میانگین برآورد شده تابش کل خورشیدی، \bar{o} میانگین اندازه‌گیری شده تابش کل خورشیدی و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

در این تحقیق برای به دست آوردن تابش رسیده به سطح زمین از رابطه بلک استفاده شد. بدین منظور ابتدا لازم بود کارآیی این رابطه در ایستگاه مشهد که داده‌های پیرانومتر در دسترس بود، مورد بررسی قرار گیرد و در صورت مثبت بودن نتیجه، از این رابطه برای به دست آوردن تابش رسیده به سطح زمین در نقاطی که فاقد داده‌های مربوط به پیرانومتر هستند، استفاده شود. شکل ۲ نتایج محاسبات انجام شده را نشان می‌دهد.

آن‌هاست، استفاده شود. شاخص‌های ذکر شده به صورت روابط ۹ تا ۱۲ می‌باشند:

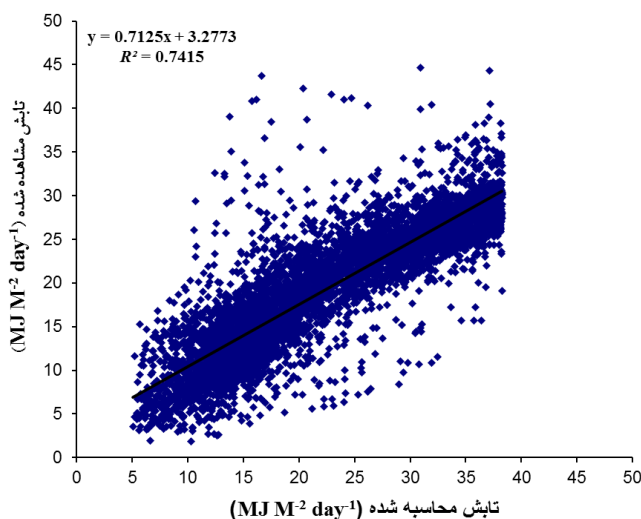
$$R^2 = \left[\frac{\sum_1^n (p_i - \bar{p}) \cdot (o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_1^n (p_i - \bar{p})^2} \cdot \sqrt{\sum_1^n (o_i - \bar{o})^2}} \right]^2 \quad [9]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad [10]$$

$$MBE = \frac{\sum_1^n (p_i - o_i)}{n} \quad [11]$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad [12]$$

در روابط فوق، p_i مقدار برآورد شده تابش کل خورشیدی، o_i مقدار اندازه‌گیری شده تابش کل



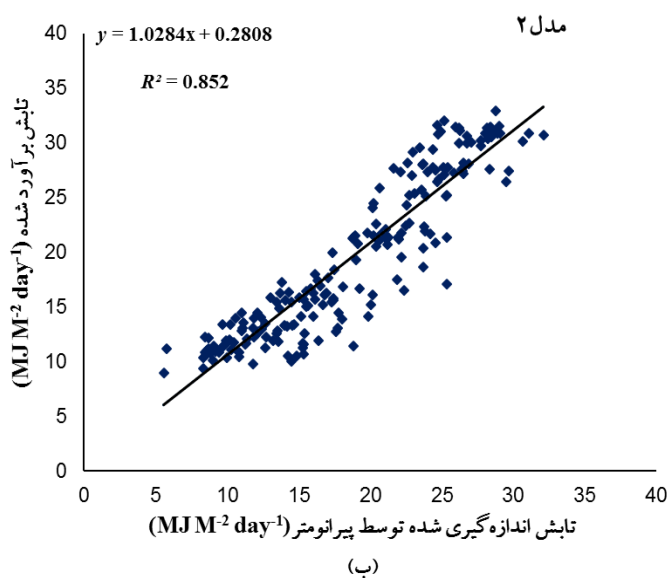
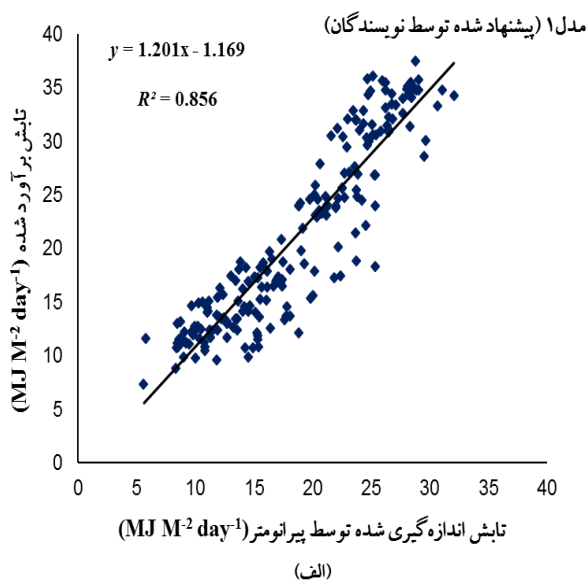
شکل ۲- رابطه بین داده‌های اندازه‌گیری شده (توسط پیرانومتر) و محاسبه شده (توسط رابطه بلک) در ایستگاه مشهد.

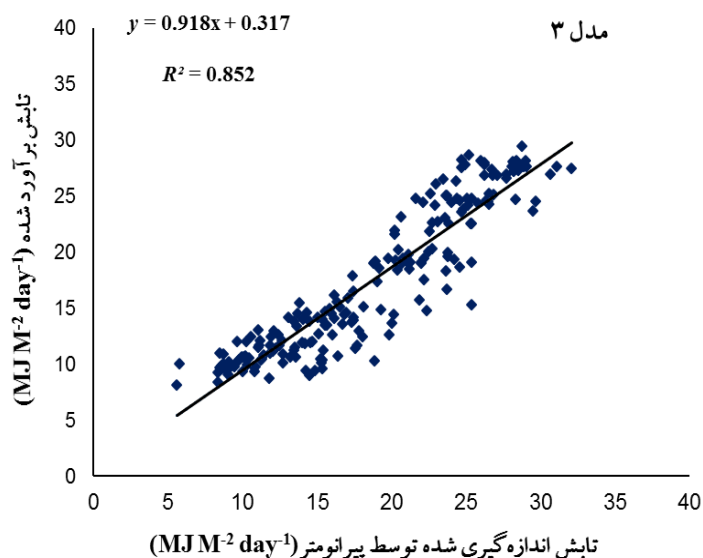
همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، معادله رگرسیونی پراکنش مقادیر برآورد شده (متغیر وابسته) را نسبت به مقادیر مشاهده شده (متغیر مستقل) نشان می‌دهد. ضریب همبستگی و ضریب تعیین بین داده‌های مشاهده شده و محاسبه شده با رابطه بلک به ترتیب برابر

۰/۸۶ و ۰/۷۴ است. به عبارت دیگر این رابطه قادر است ۷۴ درصد تغییرات تابش اندازه‌گیری شده توسط پیرانومتر را در ایستگاه مشهد شبیه‌سازی نماید. بنابراین، با توجه به نتایج فوق، می‌توان از این رابطه در نقاطی که فاقد داده‌های اندازه‌گیری شده تابش توسط

گیری شده تابش و مقدار برآورد شده آن را منعکس می‌کند و کمینه مقدار آن نشان‌دهنده بهترین الگوی تابش است (صمیمی ۱۳۷۳). همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بر اساس میزان ضریب تعیین، مدل آنگستروم - پرسکات واسنجی شده در مطالعه فعلی (۰/۸۵۳) نسبت به سایر مدل‌ها بیشترین همبستگی را با مقادیر اندازه‌گیری شده تابش نشان می‌دهد و مدل‌های ۳ و ۲ به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. همچنین با توجه به مقادیر کمتر شاخص‌های واسنجی مدل ۱ نسبت به مدل‌های دیگر می‌توان این مدل را به عنوان مناسب‌ترین مدل برآورد تابش کل خورشیدی در این ایستگاه معرفی نمود. همچنین از بین دو مدل ۲ و ۳ نیز، مدل ۳ (آنگستروم - پرسکات واسنجی شده توسط علیزاده و خلیلی) به علت دارا بودن مقادیر شاخص‌های $RMSE$ ، MBE و t کم‌تر (به ترتیب برابر $4/61$ ، $0/74$ ، $-$ ، $1/06$) همچنین ضریب تعیین بالاتر (۰/۸۵۲) نسبت به مدل ۲ (آنگستروم - پرسکات پیشنهادی توسط فائو) از دقت بالاتری برخوردار است. شکل ۴ نمودار پراکنش $\frac{R_s}{R_{so}}$ در مقابل $\frac{n}{N}$ را برای کلیه ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی در مقیاس زمانی روزانه نشان می‌دهد.

پیرانومتر هستند، استفاده نمود. پس از محاسبه تابش نظری رسیده به سطح زمین توسط رابطه بلک، واسنجی روابط آنگستروم - پرسکات در ایستگاه مشهد انجام شد. ضرایب a و b در مطالعه حاضر به ترتیب برابر ۰/۱۳ و ۰/۶ به دست آمد. این در حالی است که این ضرایب در مدل پیشنهادی توسط فائو (مدل ۲) برابر ۰/۲۵ و ۰/۵ و در مدل پیشنهادی توسط علیزاده و خلیلی (مدل ۳) به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۴۴ به دست آمده است. شکل ۳ نتایج محاسبات انجام شده توسط این سه مدل را در ایستگاه مشهد نشان می‌دهد. در این شکل، محور افقی تابش اندازه‌گیری شده توسط پیرانومتر و محور عمودی تابش محاسبه شده توسط روابط آنگستروم می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هر سه مدل توانایی نسبتاً خوبی در برآورد تابش مشاهده شده نشان داده‌اند. ضریب تعیین به دست آمده توسط هر سه مدل برابر ۰/۸۵ است. جدول ۱ مقادیر به دست آمده از مدل‌های معرفی شده را با تابش اندازه‌گیری شده توسط پیرانومتر بر حسب معیارهای مختلف آماری R^2 ، $RMSE$ ، MBE و t نشان می‌دهد. به‌طور کلی هرچه مقدار شاخص‌های خط‌اسنجی، پایین‌تر و میزان R^2 بالاتر باشد، مدل مربوطه دقیق‌تر و مناسب‌تر است. واحد مقادیر تابش بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز می‌باشد. شاخص MBE تفاوت بین مقدار اندازه-



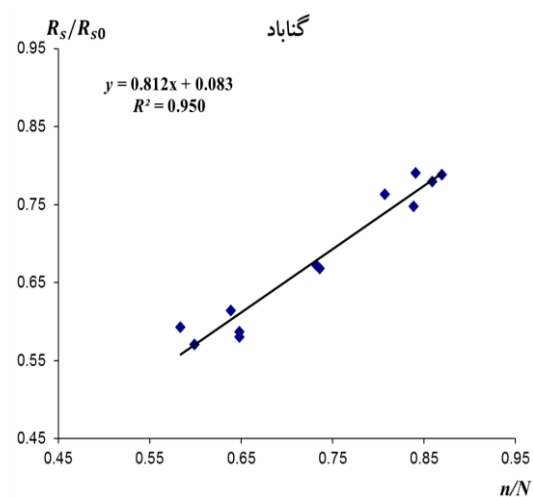
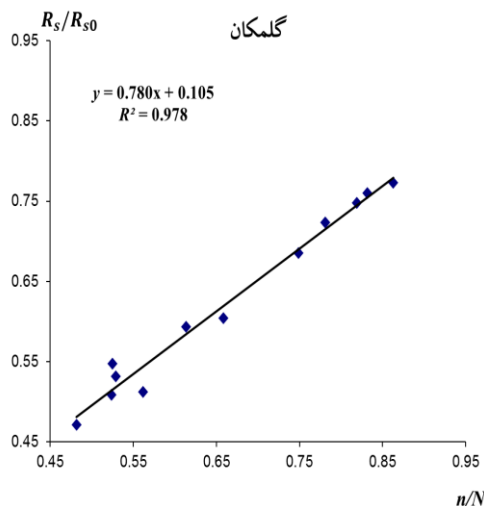


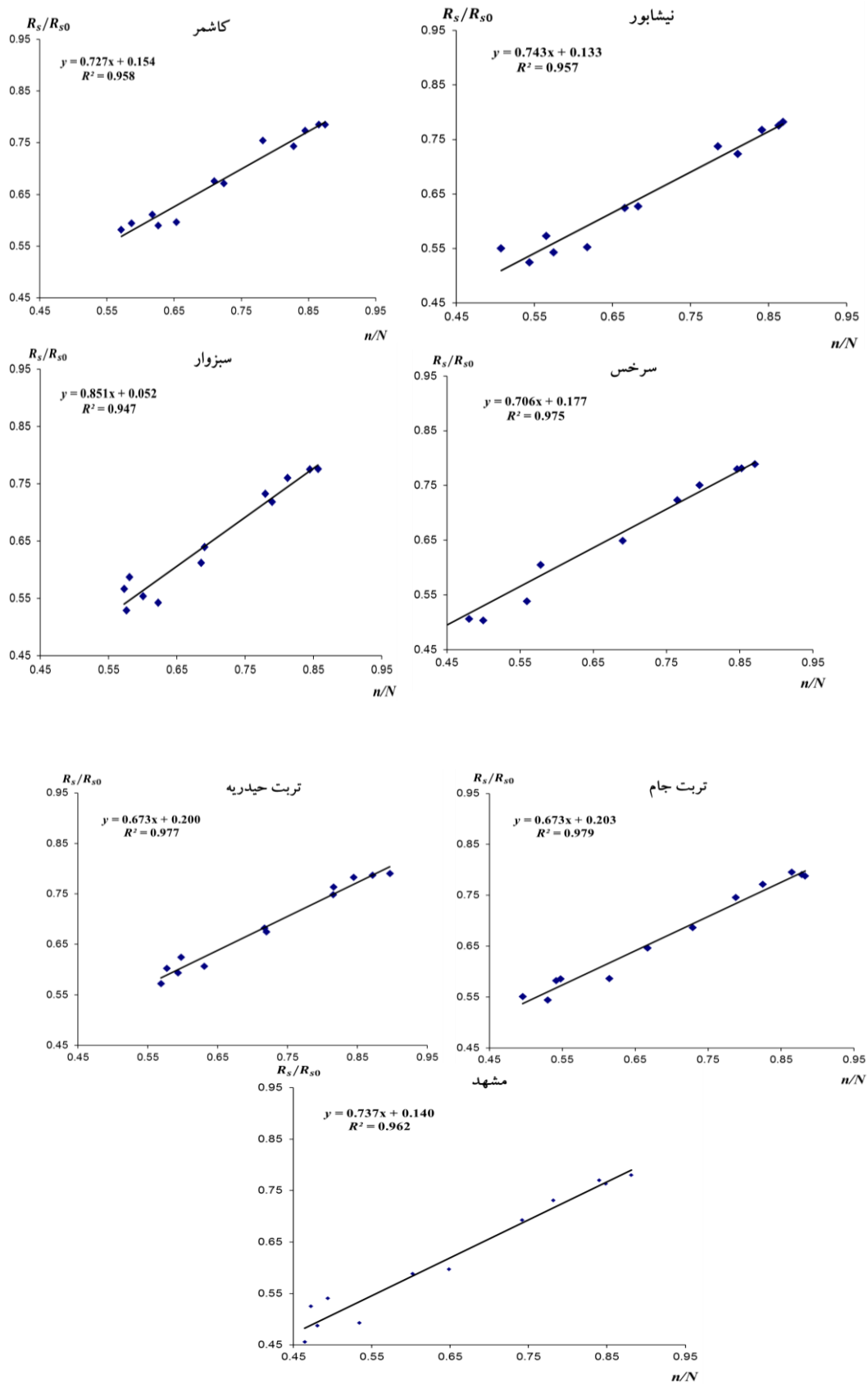
(ج)

شکل ۳- میزان همبستگی مدل‌های (الف) آنگستروم - پرسکات پیشنهادی توسط نگارندگان (مدل ۱)، (ب) آنگستروم - پرسکات پیشنهادی توسط فائو (ج) آنگستروم - پرسکات واسنجی شده توسط علیزاده و خلیلی.

جدول ۱- شاخص‌های آماری محاسبه شده معادله آنگستروم- پرسکات برای ایستگاه مشهد.

شماره مدل	مدل	R^2	RMSE	MBE	t
		($^{\circ}$)	($\text{MJ M}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	($\text{MJ M}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	($\text{MJ M}^{-2} \text{ day}^{-1}$)
۱	آنگستروم- پرسکات واسنجی شده توسط نگارندگان	۰/۸۵۳	۴/۵۷۰	-۰/۱۷۰	-۰/۲۲۰
۲	آنگستروم - پرسکات پیشنهادی توسط فائو	۰/۸۵۲	۵/۰۲۰	۱/۳۵۰	۱/۸۲۰
۳	آنگستروم - پرسکات واسنجی شده توسط علیزاده و خلیلی	۰/۸۵۲	۴/۶۱۰	-۰/۷۴۰	۱/۰۶۰





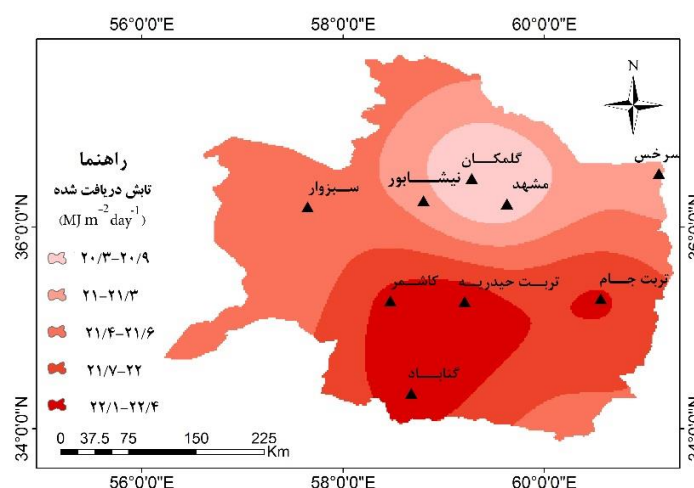
شکل ۴- نمودار تغییرات $\frac{R_s}{R_{s0}}$ نسبت به $\frac{n}{N}$ در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی.

معادله رگرسیونی خطی ساده (رابطه آنگستروم- پرسکات) برآزش یافته بر این نقاط برای ایستگاه‌های خراسان رضوی در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۵ توزیع مکانی تابش روزانه را در سطح استان خراسان رضوی با استفاده از رابطه بلک نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود پرتابش‌ترین نقاط، به نواحی جنوبی استان تعلق دارند. با توجه به این شکل می‌توان چنین استنباط نمود که مناطق پرتابش دارای دو هسته مهم در نیمه جنوبی استان می‌باشند. منطقه اول منطقه مثلثی شکلی است که رأس آن در گناباد و قاعده آن از کاشمر تا تربت حیدریه ادامه دارد. منطقه دیگر

به صورت یک هسته پرتابش در تربت جام قرار گرفته است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این مناطق برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب می‌باشند. از طرف دیگر به دلیل تابش بالای خورشید، پتانسیل تبخیر و تعرق در این مناطق بالاست، لذا بایستی از گیاهان مقاوم به خشکی در این مناطق استفاده نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با حرکت از جنوب به شمال استان، از میزان تابش دریافتی کاسته می‌شود که دلیل آن را می‌توان افزایش عرض جغرافیایی و کاهش زاویه تابش خورشید و افزایش ابرناکی هوا دانست.

جدول ۲- روابط آنگستروم - پرسکات برای ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی.

ایستگاه	معادله آنگستروم	R^2
گلمکان	$\frac{R_s}{R_{s0}} = 0.105 + 0.780 \frac{n}{N}$	۰/۹۷۸
گناباد	$\frac{R_s}{R_{s0}} = 0.083 + 0.812 \frac{n}{N}$	۰/۹۵
کاشمر	$\frac{R_s}{R_{s0}} = 0.154 + 0.727 \frac{n}{N}$	۰/۹۵۸
نیشابور	$\frac{R_s}{R_{s0}} = 0.133 + 0.743 \frac{n}{N}$	۰/۹۵۷
سبزوار	$\frac{R_s}{R_{s0}} = 0.052 + 0.851 \frac{n}{N}$	۰/۹۴۷
سرخس	$\frac{R_s}{R_{s0}} = 0.177 + 0.706 \frac{n}{N}$	۰/۹۷۵
تربت حیدریه	$\frac{R_s}{R_{s0}} = 0.200 + 0.673 \frac{n}{N}$	۰/۹۷۷
تربت جام	$\frac{R_s}{R_{s0}} = 0.203 + 0.673 \frac{n}{N}$	۰/۹۷۹
مشهد	$\frac{R_s}{R_{s0}} = 0.130 + 0.600 \frac{n}{N}$	۰/۹۶۲



شکل ۵ - میانگین روزانه تابش دریافت‌شده در سطح زمین در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی بر روی صفحه افقی.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که بین داده‌های برآوردشده به کمک مدل پیشنهادی و داده‌های اندازه‌گیری‌شده، ارتباط معناداری وجود دارد. این رابطه کاربردهای زیادی به‌ویژه در برآورد تابش کل خورشیدی در ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی دارد؛ در بسیاری از ایستگاه‌های هم‌دید استان خراسان رضوی، دستگاه پیرانومتر که مستقیماً مقدار تابش خورشیدی را اندازه‌گیری می‌کند وجود ندارد. بنابراین، با وجود رابطه معنادار (سطح معناداری ۵٪) بین داده‌های برآوردشده و داده‌های اندازه‌گیری‌شده، می‌توان با تعمیم مدل ارائه شده، مقادیر تابش کل خورشیدی رسیده به سطح افقی را در ایستگاه‌هایی که پارامتر ساعت آفتابی اندازه‌گیری می‌شود، تخمین زد. با توجه به شاخص‌های ارزیابی و مقایسه آمار اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده، در بین مدل‌های به‌کاررفته مدل پیشنهاد شده توسط نگارندگان، تابش ایستگاه هم‌دید مشهد را که داده‌های پیرانومتر آن موجود بود، با خطای کمتری تخمین زده است. به طوری که مقدار میانگین مربعات خطای مدل، ۰/۱۷- مگاژول بر

منابع مورد استفاده

آقاشری‌عتمداری ز، خلیلی ع، ایران نژاد پ و لیاقت ع، ۱۳۹۰. واسنجی و تغییرات سالانه ضرایب رابطه آنگستروم- پرسکات (a و b) در مقیاس‌های زمانی مختلف. نشریه آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۴، صفحه‌های ۹۱۱-۹۰۵.

مترمربع بر روز می‌باشد. این معیار برای مدل‌های فائو و علیزاده و خلیلی به ترتیب ۱/۳۵ و ۰/۷۴- مگاژول بر مترمربع بر روز به دست آمده است. کمترین مقدار t مربوط به مدل پیشنهادی توسط نگارندگان (۰/۲۲) می‌باشد. بنابراین، با توجه به آماره‌های خطاسنجی در ایستگاه‌های مورد استفاده می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهاد شده توسط نگارندگان در تخمین تابش روزانه نسبت به دو مدل فائو و علیزاده و خلیلی دقت بالاتری دارد. مدل علیزاده و خلیلی (مدل ۳) نیز در مقایسه با مدل فائو (مدل ۲) خطای نسبتاً کمتری دارد. همچنین مدل پیشنهادی توسط نگارندگان، دارای ضریب تبیین بیشتری در مقایسه با سایر مدل‌هاست. نتایج حاصل از پهنه‌بندی تابش نشان داد مناطق جنوبی استان از نظر دریافت تابش، توان بیشتری دارند و با حرکت از جنوب به شمال استان خراسان رضوی، از میزان تابش دریافتی کاسته می‌شود که دلیل آن را می‌توان افزایش عرض جغرافیایی، کاهش زاویه تابش خورشید و افزایش ابرناکی هوا دانست.

- خلیلی ع و رضایی صدر ح، ۱۳۷۶. برآورد تابش کلی خورشید در گستره ایران بر مبنای داده‌های اقلیمی. تحقیقات جغرافیایی، شماره ۴۶، صفحه‌های ۱۵ تا ۳۵.
- صفائی ب، خلجی اسدی م، تقی زاده ح، جیلای ا، طالقانی گ و دانش م، ۱۳۸۴. برآورد پتانسیل تابش خورشیدی در ایران و تهیه اطلس تابشی آن. علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۳۳، صفحه‌های ۲۷ تا ۳۴.
- صمیمی ج، ۱۳۷۳. برآورد تابش خورشیدی بر اساس ارتفاع و کاربرد آن در اقلیم خورشیدی ایران. مجله فیزیک، شماره ۱۲، صفحه‌های ۱۸ تا ۲۶.
- علیزاده ا و خلیلی ن، ۱۳۸۸. تعیین ضرایب معادله آنگستروم و توسعه یک معادله رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی (مطالعه موردی: منطقه مشهد). آب و خاک (علوم صنایع کشاورزی)، جلد ۲۳، شماره ۱، صفحه‌های ۲۲۹ تا ۲۳۸.
- فلاح قاهره غ، ۱۳۹۳. آب و هوای لایه مرزی. انتشارات دانشگاه حکیم سبزواری. چاپ اول. صفحه‌های ۴۱ تا ۵۸.
- معینی س، جوادی ش، کوکبی م و دهقان منشادی م، ۱۳۸۹. برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه. نشریه انرژی ایران، دوره ۱۳، شماره ۲، صفحه‌های ۱ تا ۱۰.
- موسوی بایگی م، اشرف ب و میان آبادی آ، ۱۳۸۹. بررسی مدل‌های مختلف برآورد تابش خورشیدی به منظور معرفی مناسب‌ترین مدل در یک اقلیم نیمه‌خشک. مجله آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، صفحه‌های ۸۳۶ تا ۸۴۴.
- نادی م، بذرافشان ج و قهرمان ن، ۱۳۸۹. مقایسه روش‌های مختلف تخمین پارامترهای مدل آنگستروم برای برآورد تابش روزانه خورشید بر رویه‌های افقی. صفحه‌های ۱۳۹ تا ۱۴۲. چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، مقالات شفاهی، تهران، انجمن ژئوپلتیک ایران.

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage, Paper No 56, Rome.
- Almorox J, Hontoria C, Benito M, 2011. Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). Applied Energy 88:1703-1709.
- Angstrom A.k, 1924. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society 50: 121-125.
- Anonymous. 2003. World agriculture. Towards 2015/2030. A FAO Perspective. Earth scan Publications Ltd., London.
- Belcher BN, DE Gaetano AT, 2007. A revised empirical model to estimate solar radiation using automated surface weather observations. Solar Energy 81(3): 329-345.
- Jacovides CP, 1997. Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. Agricultural Water Management 3: 95-97.
- Liasat, MC. Snyder, RL, 1998. Data error effects on net radiation and evapotranspiration estimation. Agricultural and Forest Meteorology 91(3/4): 209-221.
- Liu X, Li Y, Zhonghu X, Zhao C, Jensen JR, Zhao Y, 2014. Towards increasing availability of the Ångström-Preseott radiation parameters across China: Spatial trend and modeling, Energy Conversion and Management 87(11): 975-989.
- Paltridge GW, Proctor D, 1976. Monthly mean solar radiation statistics for Australia. Solar Energy 18:235-43.
- Persaud ND, Lesolle D, Ouattara M, 1997. Coefficients of the Ångström-Preseott equation for estimating global irradiance from hours of bright sunshine in Botswana and Niger, Agricultural and Forest Meteorology 88(1-4): 27-35.
- Preseott JA, 1940. Evaporation from a Water Surface in Relation to Solar Radiation. Transactions of Royal Society, South Australia 64: 114-118.
- Robaa SJ, 2009. Validation of the existing models for estimating global solar radiation over Egypt. Energy Conversion and Management 50: 184-193.
- Rosenberg, NJ, Blad, BL, Verma, SB. 1983. Microclimate: The Biological Environment, 2nd Ed. Wiley (Interscience), New York.
- Yang K, Koike T, Ye B, 2006. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. Agricultural and Forest Meteorology 137: 43-55.