



Evaluation of the Efficiency of Solar Radiation Estimation Models in Simulating the Yield and Water Requirement of Wheat

Seyed Farhad Saberli^{1✉} | Zahra Shirmohammadi-Aliakbarkhani² | Mansoureh Kouhi³

1. Corresponding Author, Department of Horticulture Science and Engineering, High Educational Complex of Torbat-e Jam, Khorasan Razavi, Iran. ORCID ID: 0000-0002-1868-1313. Email: sf.saberli@tjamcaas.ac.ir
2. Department of Water Science and Engineering, High Educational Complex of Torbat-e Jam, Khorasan Razavi, Iran. ORCID ID: 0000-0001-6332-8976. Email: shirmohammadi@tjamcaas.ac.ir
3. Disasters and Climate Change Research Group- CRI (RIMAS), Mashhad, Iran. ORCID ID: 0000-0001-5528-7633.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: October 14, 2023

Received in revised form:

December 28, 2023

Accepted: January 25, 2024

Published online: June 21,

2024

Keywords:

Angstrom-Prescott model, evapotranspiration, power model, simulation.

ABSTRACT

Solar radiation is one of the main inputs to crop growth models to estimate growth and yield. This study was conducted with the aim of evaluating the impact of radiation estimation accuracy by different models on the accuracy of simulating wheat evapotranspiration and yield by CSM-CERES-Wheat model in Razavi Khorasan province. The efficiency of simple models including Angstrom-Prescott, Angstrom-Prescott suggested by FAO, Hargreaves-Samani, Hargreaves-Samani suggested by FAO, Kermani, Hunt and Power have been evaluated in this study. The results of the radiation estimation for different models in the calibration stage showed that Kermani, Angstrom-Prescott calibrated, Angstrom-Prescott models with FAO recommended coefficients, Power, Hunt and Hargreaves-Samani gave the closest estimates compared to the measured radiation in Mashhad, respectively. In the validation stage of the calibrated models, it is found that the Power, Kermani, Angstrom-Prescott models had the most accurate estimation of daily radiation compared to the measured radiation in the study areas, respectively. Furthermore, the lowest difference between simulated yield and evapotranspiration of wheat using the observed radiation data and the estimated radiation data is obtained from the models of Power, calibrated Angstrom-Prescott, Angstrom-Prescott with FAO suggested coefficients and finally the Kermani, respectively. Considering the accuracy and extensive spatial coverage of the radiation data in the Power model, it is recommended to use it as the best radiation estimation method for use in the crop models.

Cite this article: Saberli, S.F., Shirmohammadi-Aliakbarkhani, Z., & Kouhi, M. (2024). Evaluation of the efficiency of solar radiation estimation models in simulating the yield and water requirement of wheat. *Journal of Field Crop Science*, 55(2), 43-58. DOI: [10.22059/ijfcs.2024.366671.655032](https://doi.org/10.22059/ijfcs.2024.366671.655032).





انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

شاپا الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در شبیه‌سازی عملکرد و برآورد نیاز آبی گندم

سید فرهاد صابرعلی^{۱*} | زهرا شیرمحمدی-علی اکبرخانی^۲ | منصوره کوهی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی باغبانی، مجتمع آموزش عالی تربت جام، خراسان رضوی، ایران. ORCID ID: 0000-0002-1868-1313، رایانامه: sf.saberali@tjamcaas.ac.ir
۲. گروه علوم و مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی تربت جام، خراسان رضوی، ایران. ORCID ID: 0000-0001-6332-8976، رایانامه: shirmohammadi@tjamcaas.ac.ir
۳. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران.

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|--|
| <p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۰۷</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها: تبخیر و تعرق، شبیه‌سازی، مدل آنگستروم-پرسکات، مدل پاور.</p> | <p>تابش خورشیدی از جمله ورودی‌های اصلی به مدل‌های رشد گیاهان زراعی برای تخمین رشد و عملکرد گیاهان محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف ارزیابی میزان تاثیرگذاری دقت تخمین تابش توسط مدل‌های مختلف بر صحت برآورد تبخیر و تعرق و عملکرد گندم توسط مدل CSM-CERES-Wheat در سطح استان خراسان رضوی انجام شد و کارایی مدل‌های ساده‌ای شامل آنگستروم-پرسکات، آنگستروم-پرسکات پیشنهادی فائو، هارگریوز-سامانی، هارگریوز-سامانی پیشنهادی فائو، کرمانی، هانت و پاور در این مطالعه ارزیابی شد. نتایج حاصل از تخمین تابش مدل‌های مختلف در مرحله واسنجی نشان داد که مدل‌های کرمانی، آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده، آنگستروم-پرسکات با ضرایب پیشنهادی فائو، پاور، هانت و هارگریوز-سامانی واسنجی شده به ترتیب نزدیک‌ترین تخمین را نسبت به تابش اندازه‌گیری شده در مشهد داشتند. در مرحله صحت‌سنجی مدل‌های واسنجی شده نیز مشخص شد که مدل‌های پاور، کرمانی و آنگستروم-پرسکات به ترتیب دقیق‌ترین تخمین تابش روزانه را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده آن در مناطق مورد بررسی داشتند. همچنین در کل منطقه مورد مطالعه کمترین اختلاف بین عملکرد گندم و تبخیر و تعرق برآورد شده با استفاده از داده‌های تابش مشاهده شده و داده‌های تابش تخمین زده شده به ترتیب مربوط به مدل پاور، مدل آنگستروم-پرسکات واسنجی شده، مدل آنگستروم-پرسکات با ضرایب پیشنهادی فائو و نهایتاً مدل کرمانی بود. با توجه به دقت و پوشش گسترده مکانی داده‌های تابش در مدل پاور استفاده از آن به عنوان بهترین روش تخمین تابش برای کاربرد در مدل‌های رشد گیاهی توصیه می‌شود.</p> |

استناد: صابرعلی، س.ف.، شیرمحمدی-علی اکبرخانی، ز.، و کوهی، م. (۱۴۰۳). ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در شبیه‌سازی عملکرد و برآورد نیاز آبی گندم. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۵(۲)، ۴۳-۵۸. DOI: 10.22059/ijfcs.2024.366671.655032



© نویسنده‌گان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

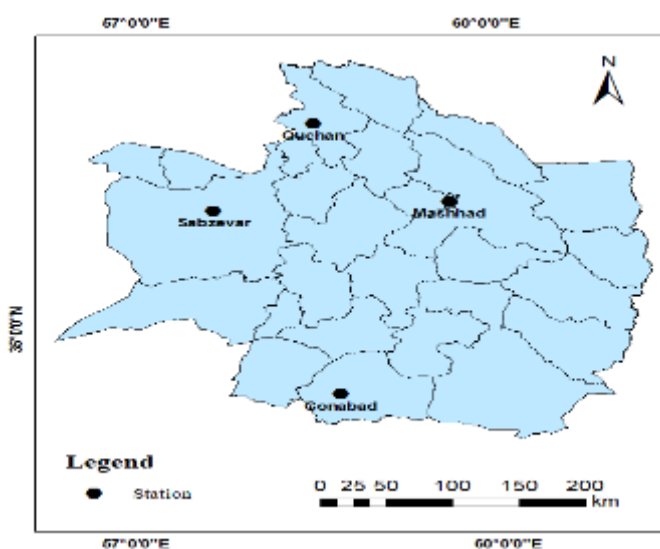
میزان دریافت تابش خورشیدی زمین و توزیع مکانی و زمانی آن مهمترین عامل اکولوژیکی موثر بر رشد و نمو گیاهان در زیست-بوم‌های طبیعی و کشاورزی است. تابش خورشیدی، انرژی لازم برای فتوسنتز و تعرق گیاهان را فراهم کرده و از جمله عوامل اکولوژیک تعیین‌کننده تولید بالقوه یک محصول در یک منطقه می‌باشد. امروزه، مدل‌های شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی به عنوان ابزاری برای تخمین عملکرد، تعیین ریسک تولید و کمک به تصمیمات مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Heiniger *et al.*, 1997).

مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی رشد گیاهان و تخمین تبخیر و تعرق برای برآورد نیاز آبی گیاهان به داده‌های تابش خورشیدی روزانه به عنوان ورودی نیاز دارند (Jones *et al.*, 2003)، در تعداد محدودی از ایستگاه‌های هواشناسی داده‌های تابش خورشیدی با کیفیت مناسب به صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شوند. توجه به محدودیت مکانی و زمانی اندازه‌گیری‌های تابش و پوشش غیر یکنواخت و کیفیت متفاوت داده‌های اندازه‌گیری شده در مناطق مختلف از یک طرف و نیاز به داده‌های تابش خورشیدی با کیفیت برای مدل‌های رشد گیاهان از طرف دیگر، محققان را بر آن داشته تا روش‌هایی را برای تخمین داده‌های ورودی مدل‌ها توسعه دهند (Samani, 2000; Jones *et al.*, 2003). این مدل‌ها به سه دسته کلی مدل‌های تصادفی تولید داده‌های هواشناسی، مدل‌های تجربی و مدل‌های مکانیستیک تقسیم می‌شوند (Perdinan *et al.*, 2021). در مدل‌های تصادفی، داده‌های آب و هوایی بر اساس ویژگی‌های آماری در آب و هوای مشاهده‌شده در بلندمدت در یک مکان مشخص تولید می‌شوند (Vesely *et al.*, 2019; Perdinan *et al.*, 2021). در مدل‌های تجربی برای تخمین تابش خورشیدی در یک مکان از متغیرهای آب و هوای روزانه و روش‌های رگرسیونی استفاده شده است (Ball *et al.*, 2004). در مدل‌های مکانیستیک نیز تابش خورشیدی روزانه از تابش روزانه فرازمینی در یک مکان تخمین زده می‌شود (Liu & Scott, 2001; Perdinan *et al.*, 2021). این مدل‌های مکانیستیک از نظر درجه پیچیدگی از فرمول‌های تجربی ساده مبتنی بر داده‌های معمول آب و هوایی گرفته تا مدل‌های پیچیده مبتنی بر انتقال، جذب و پخشیدگی پرتو خورشیدی هنگام عبور از جو متفاوت است (Goodin *et al.*, 1999). استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر با وجود توانایی زیاد برای تخمین بسیار دقیق تابش خورشیدی به دلیل نیاز به داده‌های ورودی زیاد و محاسبات پیچیده و فشرده به شرایط خاص محدود شده است (Goodin *et al.*, 1999). روش‌های ساده‌تر تخمین تابش خورشیدی به دلیل سادگی محاسبات و نیاز به داده‌های ورودی کمتر و قابل دسترس، کاربرد بیشتری در مطالعات کشاورزی نسبت به مدل‌های پیچیده دارند.

مطالعات گسترده‌ای در کشور برای ارزیابی مدل‌های مختلف تخمین تابش خورشیدی انجام شده است. به طور مثال، در یک مطالعه در ایستگاه هواشناسی مشهد گزارش شد که مدل آنگستروم-پرسکات پیشنهادی توسط فائو بهترین مدل تخمین تابش می‌باشد (Mousavi-Baygi *et al.*, 2010). Jahani *et al.* (2017) نیز با مقایسه کارایی مدل‌های مختلف در تخمین تابش در ۲۳ مرکز استان در ایران گزارش کردند که دقت مدل‌های مختلف تحت تاثیر منطقه مورد مطالعه بوده و مدل کرمانی و آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده از دقت بهتری در تخمین تابش در اغلب ایستگاه‌های مورد مطالعه برخوردار بودند. در یک مطالعه در ۱۰ منطقه از کانادا نیز مشخص شد که مدل هانت از دقت تخمین تابش قابل قبولی برای کاربرد در مدل‌های گیاهی برخوردار است (Qian *et al.*, 2019). اغلب مطالعات در ایستگاه هواشناسی واقع در مرکز هر استان انجام شده است و دقت تخمین آنها در شهرستان‌های آن استان اغلب ارزیابی نشده است. لذا صحت و دقت ضرایب ثابت این مدل‌ها برای مکان‌های دیگر غیر از مکان واسنجی و میزان اطمینان از دقت تخمین این مدل‌ها در مکان‌های دور از منطقه واسنجی مشخص نیست. به علاوه، میزان تاثیرگذاری دقت تخمین تابش توسط مدل‌های مختلف تابش بر دقت برآورد تبخیر و تعرق و رشد و عملکرد گیاهان در مدل‌های گیاهی اغلب مشخص نشده است. لذا با توجه به فقدان داده‌های ذکر شده در این پژوهش، در ابتدا توانایی تخمین چند مدل ساده تابش خورشیدی که برای تخمین تابش خورشیدی به داده‌های کم و قابل دسترس نیاز دارند، ارزیابی شد. سپس تاثیر تغییرات مکانی و زمانی بر درستی تخمین مدل‌های کالیبره‌شده در مشهد برای اندازه‌گیری مقادیر تابش خورشیدی در چندین شهرستان استان خراسان رضوی ارزیابی شد. در نهایت تاثیر دقت تخمین تابش توسط مدل‌های مختلف بر خروجی‌های مدل گیاهی گندم مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. روش‌شناسی پژوهش

برای انجام این تحقیق داده‌های درازمدت تابش خورشیدی در سطح زمین که در ایستگاه‌های هواشناسی استان خراسان رضوی ثبت شدند از پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد تهیه شد. از بین ایستگاه‌های موجود در استان با قابلیت ثبت داده‌های تابش خورشیدی، چهار ایستگاه مشهد، سبزوار، قوچان و گناباد که کیفیت داده‌های ثبت‌شده بهتر و در بازه زمانی طولانی‌تری داشتند، انتخاب شدند. موقعیت مکانی ایستگاه‌هایی که داده‌های تابش آن مورد بررسی قرار گرفت در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در استان خراسان رضوی.

داده‌های تابش خورشیدی در ایستگاه مشهد از سال ۱۹۹۲ میلادی (۱۳۷۰ شمسی) در دسترس هستند؛ با این وجود، کیفیت داده‌های ثبت‌شده قبل از سال ۲۰۰۶ با بعد آن تفاوت آشکاری دارد (شکل ۲)، لذا داده‌های بعد از سال ۲۰۰۶ برای واسنجی و صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به هدف این تحقیق، داده‌های هواشناسی ایستگاه مشهد به دو بازه زمانی تقسیم شد که بازه اول در فاصله سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ (۱۳۸۴-۱۴۰۰) به‌منظور واسنجی مدل‌های تخمین تابش خورشیدی و بازه دوم از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ (۲۰۲۱-۱۳۹۵) به‌منظور ارزیابی صحت این مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به‌علاوه، مدل‌های توسعه‌یافته با داده‌های ایستگاه مشهد، به‌منظور ارزیابی صحت تخمین آنها در سایر ایستگاه‌های سطح استان خراسان رضوی نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای انتخاب مجموعه داده مناسب به‌منظور واسنجی مدل‌ها در ایستگاه مشهد، ابتدا داده‌های روزانه تابش (به‌عنوان متغیر وابسته) در مدت زمان اندازه‌گیری (به‌عنوان متغیر مستقل) در یک شکل رسم و بازه‌های زمانی با داده مفقودشده کمتر و با کیفیت‌تر برای ادامه پژوهش انتخاب شدند (شکل ۲). در ادامه نیز داده‌های پرت در این بازه‌های زمانی حذف شدند. در مورد داده‌های تابش، چنانچه داده‌های ثبت‌شده در یک ایستگاه هواشناسی بیشتر از ۷۵ درصد و کمتر از ۱۰ درصد مقدار تابش روزانه فرازمینی (Ra) بودند، به‌عنوان داده پرت در نظر گرفته شده و از مجموعه داده‌ها حذف شدند (Page, 2018; Allen *et al.*, 2005). در نهایت بعد از برازش اولیه تمامی مدل‌ها در صورتی که مقدار باقیمانده استاندارد شده (standardized residual) تابش در هر روز بیشتر و یا کمتر از دو بود، آن داده‌ها حذف شدند (Archontoulis & Miguez, 2015). باتوجه به اینکه پژوهشگران اغلب از داده‌های اصلی دریافت‌شده از ایستگاه‌های هواشناسی و بدون حذف داده‌های پرت برای تخمین تابش استفاده می‌کنند، لذا برای ارزیابی مدل‌ها در مرحله صحت‌سنجی، فرآیند حذف داده‌های پرت انجام نشد. لازم به ذکر است در صورتی که کمتر از پنج درصد از کل طول دوره رشد (حدود ۱۲ روز از کل دوره رشد) فاقد داده‌های تابش بود، از داده‌های شبیه‌سازی‌شده بهترین مدل برای تخمین تشعشع در آن روزها استفاده شد که امکان اجرای مدل گیاهی فراهم شود و در صورتی که تعداد داده‌های گم‌شده بیشتر از پنج درصد کل دوره رشد بود، شبیه‌سازی‌های رشد گیاهی در آن سال‌ها انجام نشد. برای شبیه‌سازی رشد گندم نیز از مدل CSM-

CERES-Wheat کالیبره شده در سطح استان خراسان رضوی (Saberali *et al.*, 2022) استفاده شد. بدین منظور داده‌های روزانه تابش، دمای بیشینه و کمینه، و بارش به عنوان ورودی به مدل معرفی شد، و شبیه‌سازی در شرایط پتانسیل تولید بدون محدودیت آب و نیتروژن انجام شد.

مدل‌های مختلفی برای تخمین تابش خورشیدی در سطح افقی زمین توسعه یافته است، لذا با توجه به اهداف این پژوهش مدل‌های انتخاب شده بر اساس سه شاخصه سادگی، داده‌های ورودی قابل دسترسی و کارایی از بین بیش از ۶۰ مدل ارزیابی شده برای تخمین نور خورشید در سطح زمین انتخاب شدند (Prieto & García, 2022; Jahani *et al.*, 2017; Perdinan *et al.*, 2021; Khorasanizadeh & Mohammadi, 2013).

مدل آنگستروم (Angstrom, 1924) که در سال ۱۳۴۰ توسط پرسکات (Prescott, 1940) تصحیح شد، تابش خورشید را به صورت زیر تخمین می‌زند:

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

که در آن R_a تابش رسیده به سطح افقی خارجی جو یا فرازمینی ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، n و N به ترتیب ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی و طول روز نجومی محاسبه شده (فاصله زمانی بین طلوع و غروب خورشید) در آن منطقه است. a و b نیز ضرایب ثابت معادله می‌باشند.

مدل آنگستروم-پرسکات با ضرایب ثابت پیش فرض ($a=0.50$ و $b=0.25$) نیز توسط فائو (Allen *et al.* 1998) برای مناطقی که داده‌های تابشی برای واسنجی مدل وجود ندارد توصیه شده است. لازم به ذکر است همین ضرایب در برنامه Weatherman که ابزار کمی برای آماده‌سازی داده‌های آب و هوای روزانه برای استفاده در مدل شبیه‌سازی Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) است، برای تخمین تابش از ساعات آفتابی استفاده می‌شود.

مدل هارگریوز-سامانی مدل ساده‌ای برای تخمین تابش است که تنها به داده‌های دما نیاز دارد و به صورت زیر ارزیابی شده است (Hargreaves & Samani, 1982):

$$R_s = a \times \sqrt{\Delta T} \times R_a$$

که در آن ΔT ، اختلاف دمای بیشینه و کمینه روزانه است، و a نیز ضریب ثابت معادله می‌باشد. مدل هارگریوز-سامانی با ضریب ثابت پیش فرض ($a=0.16$) نیز توسط فائو (Allen *et al.* 1998) برای مناطق غیر ساحلی که در آنها داده‌های تابش برای واسنجی مدل وجود ندارد، توصیه شده است. لازم به ذکر است همین ضرایب در برنامه Weatherman، برای تخمین تابش از داده‌های دما استفاده می‌شود.

مدل هانت (Hunt *et al.* 1998) از داده‌های بارش علاوه بر دما برای تخمین تابش استفاده می‌کند، و به صورت زیر ارزیابی شده است:

$$R_s = a \times \sqrt{\Delta T} \times R_a + b \times T_{max} + c \times P + d \times P^2 + e$$

که در آن T_{max} دمای بیشینه روزانه (درجه سانتیگراد) و p میزان بارش روزانه (میلی‌متر) است. a ، b ، c ، d و e نیز ضرایب ثابت معادله هستند. مدل کرمانی نیز از داده‌های ساعت آفتابی، طول روز نجومی، دما، بارش و رطوبت نسبی در قالب رابطه زیر برای محاسبه تابش استفاده کرد (Kirmani *et al.* 2015):

$$R_s = R_a \left(a \times \frac{n}{N} + b \times P + c \times RH + d \times T_{mean} + e \right)$$

که در آن T_{mean} دمای میانگین روزانه (درجه سانتیگراد) و RH نیز میانگین رطوبت نسبی روزانه (%) است. a ، b ، c ، d و e نیز ضرایب ثابت معادله هستند. تخمین ماهواره‌ای تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین نیز روش دیگر مورد استفاده است. بدین منظور از داده‌های تابش ارزیابی شده توسط ناسا که در قالب برنامه POWER در وبسایت آنها قابل دسترسی است، استفاده شد (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>). داده‌های خورشیدی POWER بر اساس مشاهدات ماهواره‌ای تشعشعات بالای جو و از طریق یک مدل انتقال تابشی تخمین زده می‌شود (NASA, 2019; Gupta *et al.*, 2006). به منظور محاسبه تابش فرازمینی (R_a) مورد نیاز در مدل نیز از رابطه زیر استفاده شد:

$$R_a = \frac{24}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} j\right)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} j - 1.39\right)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

که در آن R_a ، تابش فرازمینی، G_{sc} ثابت خورشیدی (۴/۹۲ مگاژول بر متر مربع بر ساعت)، d_r عکس فاکتور فاصله نسبی زمین از خورشید، ω_s زاویه ساعت غروب آفتاب (رادیان)، φ عرض جغرافیای (رادیان)، δ زاویه میل خورشیدی (رادیان)، J شماره روزها از اول ژانویه است.

برای ارزیابی کارایی و اعتبارسنجی مدل‌ها و مقایسه تابش برآوردشده توسط مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده آن، از شاخص‌های آماری زیر استفاده شد:

$$\text{ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده} \quad NRMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}\right)} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (۱)$$

$$\text{ضریب کارایی مدل (Nash-Sutcliffe)} \quad NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۲)$$

$$\text{ضریب تبیین} \quad R^2 = \frac{[\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{p})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{p})^2} \quad (۳)$$

$$\text{کای اسکور} \quad \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - P_i)^2}{P_i} \quad (۴)$$

$$\text{شاخص آماری AIC} \quad AIC = n \log(MSE) + 2k \quad (۵)$$

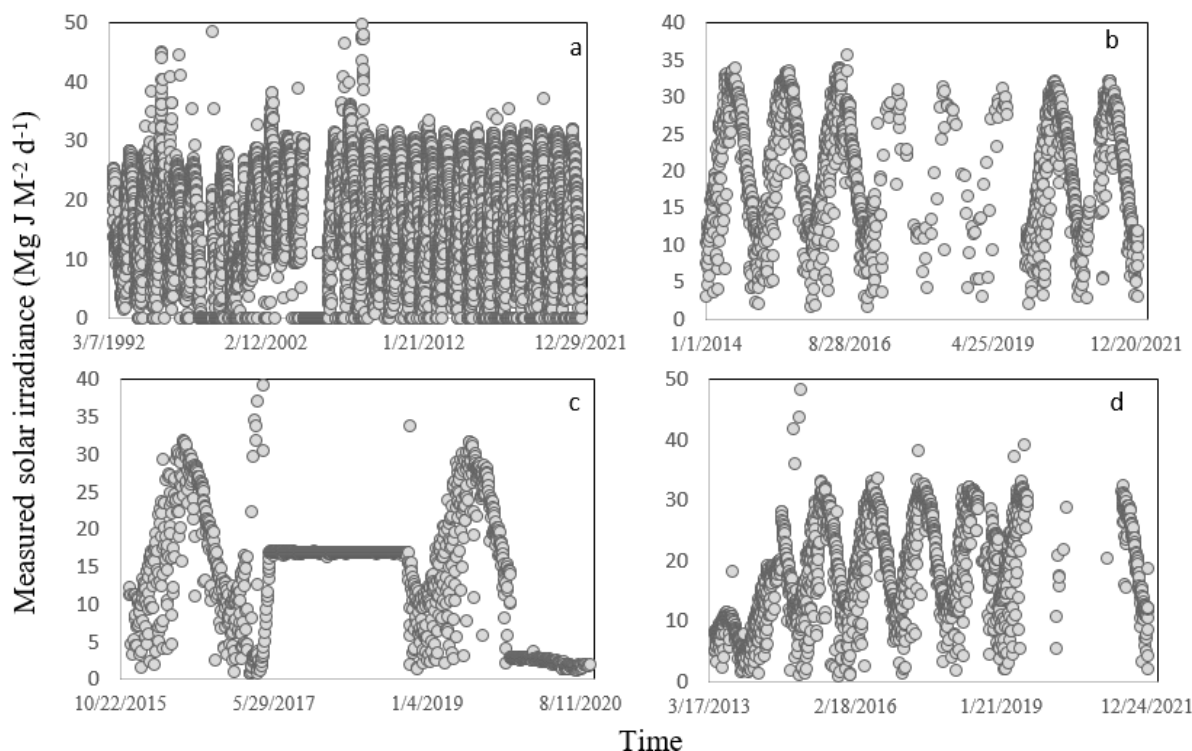
که در آن‌ها P_i مقدار برآوردشده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده (مشاهده‌شده)، n تعداد کل نمونه‌های به کاررفته و \bar{O} متوسط مقادیر مشاهده‌شده، و \bar{p} متوسط مقادیر برآوردشده توسط مدل است. شاخص آماری AIC نیز شاخصی است که هم کارایی و هم پیچیدگی مدل را در قالب یک عدد کمی می‌کند و برای انتخاب کارآمدترین مدل با کمترین پیچیدگی استفاده می‌شود. در روش تخمین حداقل مربعات فرمول محاسبه شاخص AIC به صورت بالا ارایه شده است (Burnham & Anderson 2002) که در آن n تعداد مشاهدات، MSE میانگین مربعات خطا و K تعداد پارامترهای مدل است. دامنه ضریب کارایی مدل (Nash-Sutcliffe) بین منفی بی‌نهایت تا یک است که مقدار یک نشان‌دهنده تطابق کامل بین داده اندازه‌گیری شده با داده تخمین زده‌شده است، درحالی که بازه کمتر از صفر زمانی رخ می‌دهد که واریانس بین داده‌های مشاهده‌شده کمتر از واریانس متغیر برآوردشده باشد.

۳. نتایج پژوهش و بحث

۳-۱. فرآیند آماده‌سازی داده‌های تابش

داده‌های تابش خورشیدی در بازه‌های زمانی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ایستگاه مشهد کیفیت داده‌های تابش ثبت‌شده در سال‌های قبل از ۲۰۰۶ نسبت به کیفیت داده‌های ثبت‌شده بعد از آن متفاوت بود. به همین دلیل از داده‌های در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۱ برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شد. در ایستگاه سبزوار نیز داده‌های گم‌شده فراوانی در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ وجود داشت که با توجه به اینکه مدل گیاهی به داده‌های روزانه پیوسته برای شبیه‌سازی رشد و نمو نیاز داشت، در این بازه زمانی امکان شبیه‌سازی رشد وجود نداشت. داده‌های تابش ثبت‌شده در ایستگاه قوچان نیز در بخش عمده‌ای از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ معتبر نبود و به همین دلیل از مجموعه داده‌ها حذف شد و امکان اجرای مدل گیاهی نیز در این بازه وجود نداشت. در ایستگاه گناباد نیز داده‌های ثبت‌شده در سال ۲۰۱۳ و شش ماه ابتدایی سال ۲۰۱۴ داده‌های معتبری نبودند که از مجموعه داده‌ها حذف شد، و داده‌های گم‌شده زیادی در بازه زمانی

۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ وجود داشت که در عمل امکان اجرای مدل گیاهی نیز در این بازه وجود نداشت. پس از حذف داده‌های نامناسب در تمامی ایستگاه‌های ذکر شده، فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها روی باقی داده‌ها انجام شد.

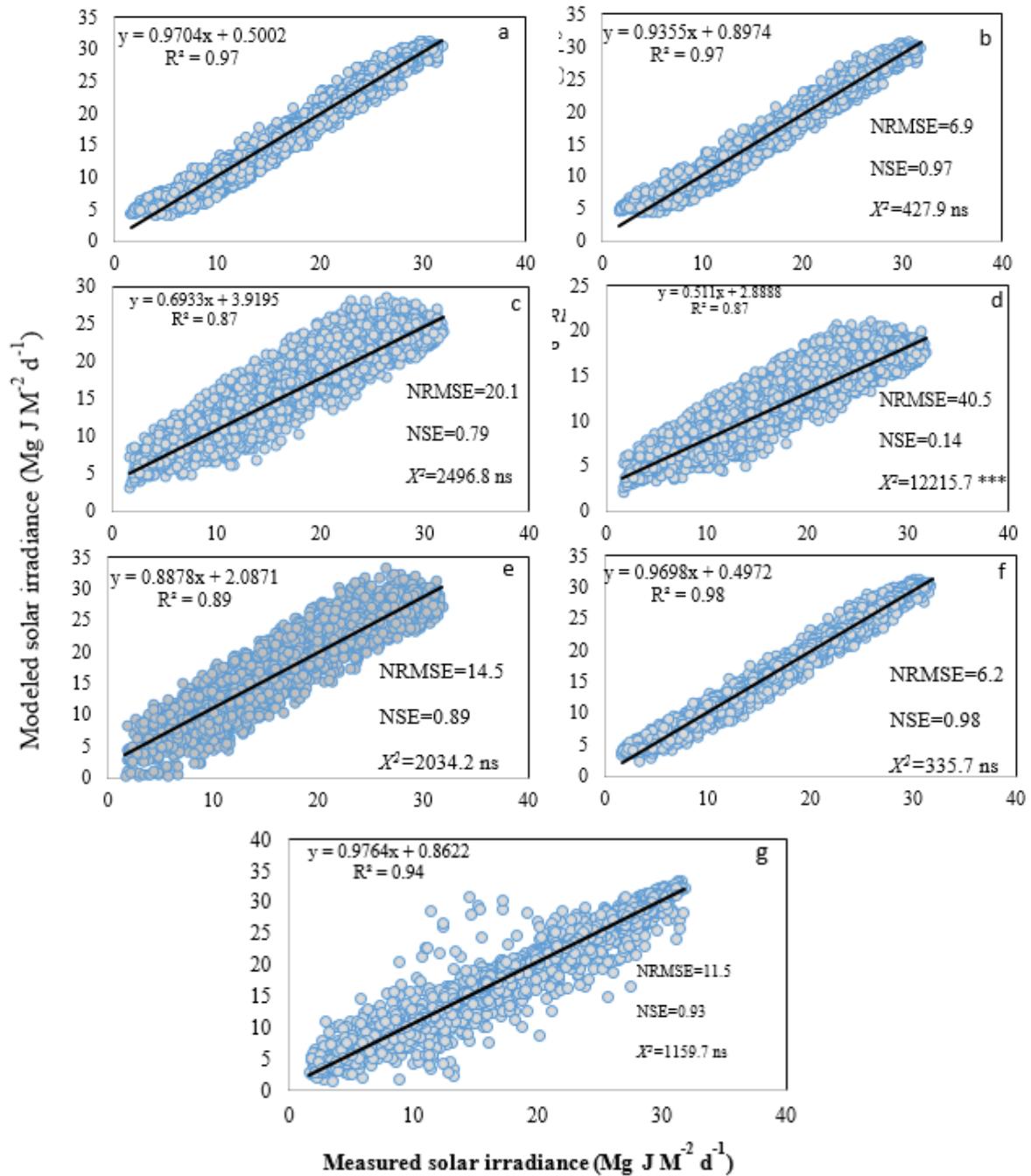


شکل ۲. بازه زمانی داده‌های تابش خورشیدی ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی مشهد (الف)، سبزوار (ب)، قوچان (ج) و گناباد (د).

۲-۳. واسنجی مدل‌های تخمین تشعشع در ایستگاه مشهد

مدل‌های برازش‌شده مختلف در مرحله واسنجی در مشهد در جدول ۱ ارایه شده است. نتایج برآورد تابش در مرحله واسنجی نشان داد که با توجه به نتایج آزمون کای اسکور اختلاف معنی‌داری بین میزان برآورد تابش و میزان اندازه‌گیری آن، بجز در مورد مدل هارگریوز-سامانی با ضرایب پیشنهادی فائو وجود نداشت (شکل ۳). مقایسه شاخص‌های آماری بین مدل‌هایی که تخمین آنها اختلاف معنی‌داری با مقادیر اندازه‌گیری شده نداشت نیز نشان داد که دقت تخمین به‌طور چشمگیری بین آنها متفاوت بود؛ به‌طوری‌که کمترین NRMS و بیشترین NSE که نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است مربوط به مدل کرمانی است (شکل ۳). جایگاه دوم، سوم، چهارم، پنجم و ششم دقت برآورد تابش نیز در بین مدل‌ها به‌ترتیب در اختیار مدل‌ها آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده، آنگستروم-پرسکات با ضرایب پیشنهادی فائو، پاور، هانت و هارگریوز-سامانی کالیبره‌شده بود (شکل ۳). نتایج مطالعات گذشته نیز اغلب نشان داده بود که مدل هارگریوز-سامانی جزء ضعیف‌ترین مدل‌ها و مدل آنگستروم-پرسکات جزء دقیق‌ترین مدل‌ها برای تخمین تابش در یک منطقه است (Jahani et al., 2017; Qian et al., 2019). در مطالعه‌ای در ایستگاه مشهد در بازه زمانی ۱۹۹۴-۲۰۰۰ نیز گزارش شد که دقت تخمین مدل‌های تابش در مرحله واسنجی بیشتر از مرحله اعتبار سنجی آنها است (Mianabadi et al., 2012). در این مطالعه ضرایب مدل آنگستروم-پرسکات برای ضرایب a و b به‌ترتیب مقادیر ۰/۲۵ و ۰/۴۲ گزارش شد که به ضرایب برآوردشده در مطالعه حاضر بسیار نزدیک می‌باشد. عواملی همچون رطوبت نسبی، میزان ابرناکی، دما، طول روز، غلظت اوزون، میزان آلودگی و گرد و غبار موجود در اتمسفر از جمله مهم‌ترین عوامل موثر بر مقدار تابش خورشیدی دریافت‌شده در یک منطقه از سطح زمین هستند (Yang et al., 2006) و بدین ترتیب تغییرات روزانه، فصلی و سالانه در تشعشع دریافتی در یک منطقه امری طبیعی است. اگرچه تمامی مدل‌های واسنجی‌شده در ایستگاه مشهد تخمین قابل قبولی از تابش در

بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ یعنی مرحله واسنجی داشتند، ولی دقت تخمین تابش برای سال‌های خارج از بازه واسنجی و در سایر ایستگاه‌های دورتر از محل واسنجی نیز بایستی ارزیابی شود.



شکل ۳. رابطه بین مقدار تشعشع اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده در مرحله کالیبراسیون توسط مدل‌های آنگستروم-پرسکات کالیبره شده (الف)، آنگستروم-پرسکات با ضرایب فائو (ب)، هارگریوز و سامانی کالیبره شده (ج)، هارگریوز و سامانی با ضرایب فائو (د)، هانت (و)، کرمانی (ه) و پاور (ی) در ایستگاه مشهد در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴.

جدول ۱. نتایج حاصل از برآورد مدل‌های مختلف در مشهد و در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ در مرحله واسنجی مدل‌ها.

| | |
|---|---|
| $Rs = R_a \left(0.28844 + 0.43444 \frac{n}{N} \right)$ | آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده |
| $Rs = R_a \left(0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right)$ | آنگستروم-پرسکات با ضرایب پیشنهادی فاو |
| $Rs = R_a \left(0.21 \times \sqrt{\Delta T} \right)$ | هارگریوز و سامانی کالیبره‌شده |
| $Rs = R_a \left(0.16 \times \sqrt{\Delta T} \right)$ | هارگریوز و سامانی با ضرایب پیشنهادی فاو |
| $Rs = R_a \left(0.498 \times \frac{n}{N} \times -0.0040 \times P + -0.000635 \times RH - 0.0011 + 0.31341 \right)$ | کرمانی |
| $Rs = 0.2495 \times \sqrt{\Delta T} \times R_a + 0.0527 \times T_{max} - 0.8395 \times P + 0.02729 \times P^2 - 1.6599$ | هانت |

۳-۳. ارزیابی مدل‌های مختلف تخمین تشعشع

به منظور ارزیابی صحت تخمین مدل‌های تابش، مقادیر تابش برآوردشده با میزان تابش اندازه‌گیری‌شده در سال‌های خارج از بازه واسنجی در منطقه مشهد و همچنین سایر شهرستان‌های اطراف مشهد مقایسه شد (شکل ۴، ۵، ۶ و ۷). نتایج آزمون کای اسکور در مرحله صحت‌سنجی در مشهد نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین میزان تابش اندازه‌گیری‌شده با میزان برآوردشده آن در مدل‌های هارگریوز-سامانی با ضرایب پیشنهادی فاو، هارگریوز-سامانی کالیبره‌شده و هانت وجود داشت (شکل ۴). مقایسه شاخص‌های آماری بین مدل‌هایی که برآورد تابش در آنها اختلاف معنی‌داری با مقادیر اندازه‌گیری‌شده آن نداشت نیز نشان داد که بالاترین دقت تخمین در بین مدل‌های مورد مطالعه مربوط به مدل کرمانی است. جایگاه دوم، سوم و چهارم دقت تخمین تابش در بین مدل‌ها نیز به ترتیب در اختیار مدل‌های آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده، مدل آنگستروم-پرسکات با ضرایب پیشنهادی فاو، و پاور بود (شکل ۴). در ایستگاه سبزوار میزان تابش اندازه‌گیری‌شده با میزان برآوردشده آن توسط مدل‌های هارگریوز-سامانی با ضرایب پیشنهادی فائو و همچنین مدل هانت اختلاف معنی‌داری داشت (شکل ۵)؛ در حالی که در ایستگاه قوچان و گناباد اختلاف معنی‌داری بین میزان تابش اندازه‌گیری‌شده با میزان تخمین‌زده‌شده آن در مدل‌های هارگریوز-سامانی کالیبره‌شده و مدل هانت مشاهده شد (شکل ۶ و ۷). همان‌طوری که مشاهده می‌شود، کارایی تخمین تابش در مدل هارگریوز و سامانی تحت تاثیر منطقه مورد استفاده قرار گرفته و نشان می‌دهد مدل واسنجی‌شده در یک منطقه قابلیت کاربرد در خارج از منطقه واسنجی را ندارد. در ایستگاه سبزوار و گناباد، دقیق‌ترین تخمین تابش به ترتیب مربوط به مدل پاور، کرمانی، آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده، آنگستروم-پرسکات با ضرایب پیشنهادی فاو، و هارگریوز-سامانی با ضرایب پیشنهادی فائو بود. در حالی که در ایستگاه قوچان دقیق‌ترین تخمین تابش به ترتیب به‌وسیله مدل آنگستروم-پرسکات با ضرایب پیشنهادی فاو، مدل کرمانی، مدل آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده، پاور و نهایتاً هارگریوز-سامانی با ضرایب پیشنهادی فائو به‌دست آمد. اندک اختلاف بین دقت مدل‌ها در ایستگاه قوچان در مقایسه با ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و گناباد به‌نظر می‌رسد بیشتر مربوط به کیفیت پایین‌تر داده‌های تابش ثبت‌شده در قوچان باشد. به‌طور کلی سه مدل پاور، کرمانی و آنگستروم-پرسکات را می‌توان برای تخمین قابل قبول تابش در سطح خراسان رضوی پیشنهاد کرد. در نهایت بهترین مدل تخمین تشعشع با توجه به شاخص آماری AIC که همزمان دو شاخص سادگی مدل (تعداد پارامتر کمتر) و کارایی آن را ارزیابی می‌کند، مدل کرمانی است. برای سایر مناطق مورد مطالعه که امکان واسنجی دقیق مدل کرمانی وجود ندارد، مدل پاور بهترین مدل تخمین تابش می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به دسترسی گسترده نقطه‌ای به داده‌های مدل پاور از طریق وب‌سایت آن و گستردگی پراکنش مزارع کشاورزی و تعداد محدود ایستگاه‌های هواشناسی در هر منطقه، مدل پاور قابلیت دسترسی راحت‌تری علاوه بر دقت برای پژوهشگران فراهم خواهد آورد. در یک مطالعه با بررسی هفت مدل مختلف برآورد تابش در ایستگاه هواشناسی مشهد در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۳، گزارش شد که مدل آنگستروم-پرسکات پیشنهادی توسط فائو بهترین مدل تخمین تابش در این منطقه در بین مدل‌های مورد مطالعه بود (Mousavi-Baygi et al., 2010). در مطالعه‌ای در ایستگاه مشهد نشان داده شد که مدل گارج که در آن علاوه بر ساعات آفتابی و طول روز نجومی از میزان بخار آب موجود در اتمسفر نیز

برای تخمین تابش خورشیدی استفاده شده بود، نسبت به مدل آنگستروم-پرسکات دقت یکسانی داشت (Mianabadi *et al.*, 2012).

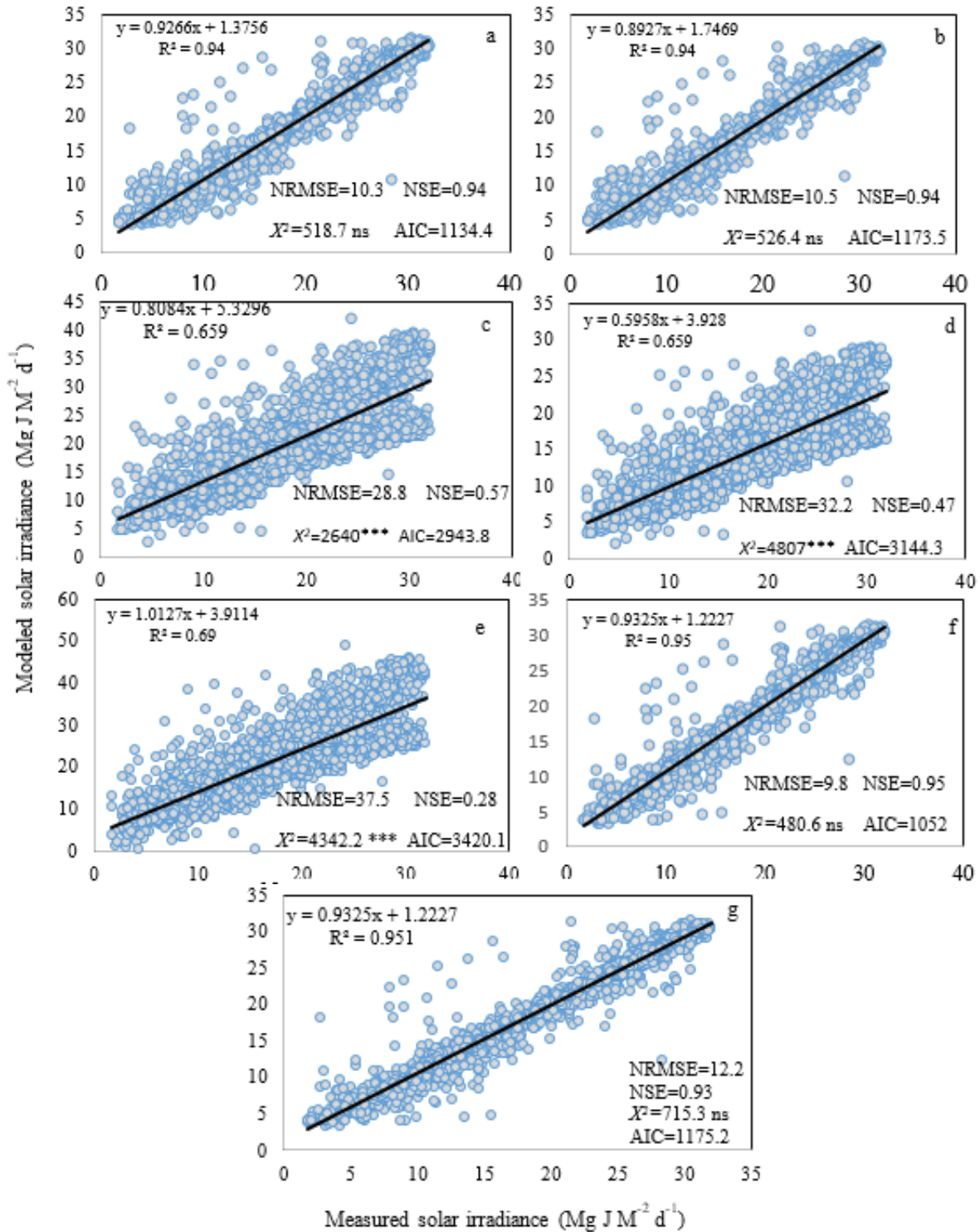
Shirmohammadi-Aliakbarkhani & Shojaei (2019) نیز در منطقه اهواز با مقایسه مدل‌های آنگستروم-پرسکات پیشنهادی توسط فاو، گلور-مک کلوت، هارگریوز-سامانی و مدل لی نتیجه‌گیری کردند که مدل آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده در منطقه بهترین کارایی را دارد. در یک مطالعه در ۱۰ منطقه از کانادا مشخص شد که دقت تخمین تابش در مدل هانت بالاتر از مدل هارگریوز-سامانی کالیبره‌شده و هارگریوز-سامانی پیشنهادی فائو بود (Qian *et al.*, 2019). Jahani *et al.* (2017) با مقایسه کارایی مدل‌های مختلف در تخمین تابش در ۳۳ مرکز استان در ایران از جمله مشهد گزارش کردند که مدل کرمانی در مقایسه با مدل‌های آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده، آنگستروم-پرسکات پیشنهادی توسط فاو، مدل هارگریوز-سامانی کالیبره‌شده و هارگریوز-سامانی پیشنهادی توسط فائو از دقت بالاتری در تخمین تابش برخوردار است. Perdinan *et al.* (2021) گزارش دادند که برآورد تابش مبتنی بر داده‌های ماهواره در مقایسه با مدل‌های تجربی تخمین تابش از جمله مدل هانت از کارایی بالاتری برخوردار است. نتایج تحقیق حاضر در خراسان رضوی همچنین نشان داد که اگرچه در مرحله واسنجی دقت مدل هانت بالاتر از مدل هارگریوز-سامانی بود، ولی در مرحله صحت‌سنجی این مدل تخمین بسیار ضعیف‌تری نسبت به مدل هارگریوز-سامانی دارد و نتایج تخمین آن فقط در منطقه واسنجی قابل قبول است. به علاوه، به طور کلی می‌توان بیان کرد که نتایج تخمین تابش توسط مدل هانت و هارگریوز-سامانی از دقت کافی برخوردار نیستند. در مطالعه‌ای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نیز گزارش شد که از بین مدل‌های آزمون‌شده نتایج برآورد تابش خورشیدی توسط مدل هارگریوز-سامانی و سامانی نسبت به مدل آنگستروم-پرسکات ضعیف بود و توصیه شد از کاربرد مدل سامانی اجتناب شود (Behmanesh *et al.*, 2017).

۴-۳. تخمین عملکرد دانه و تبخیر و تعرق واقعی

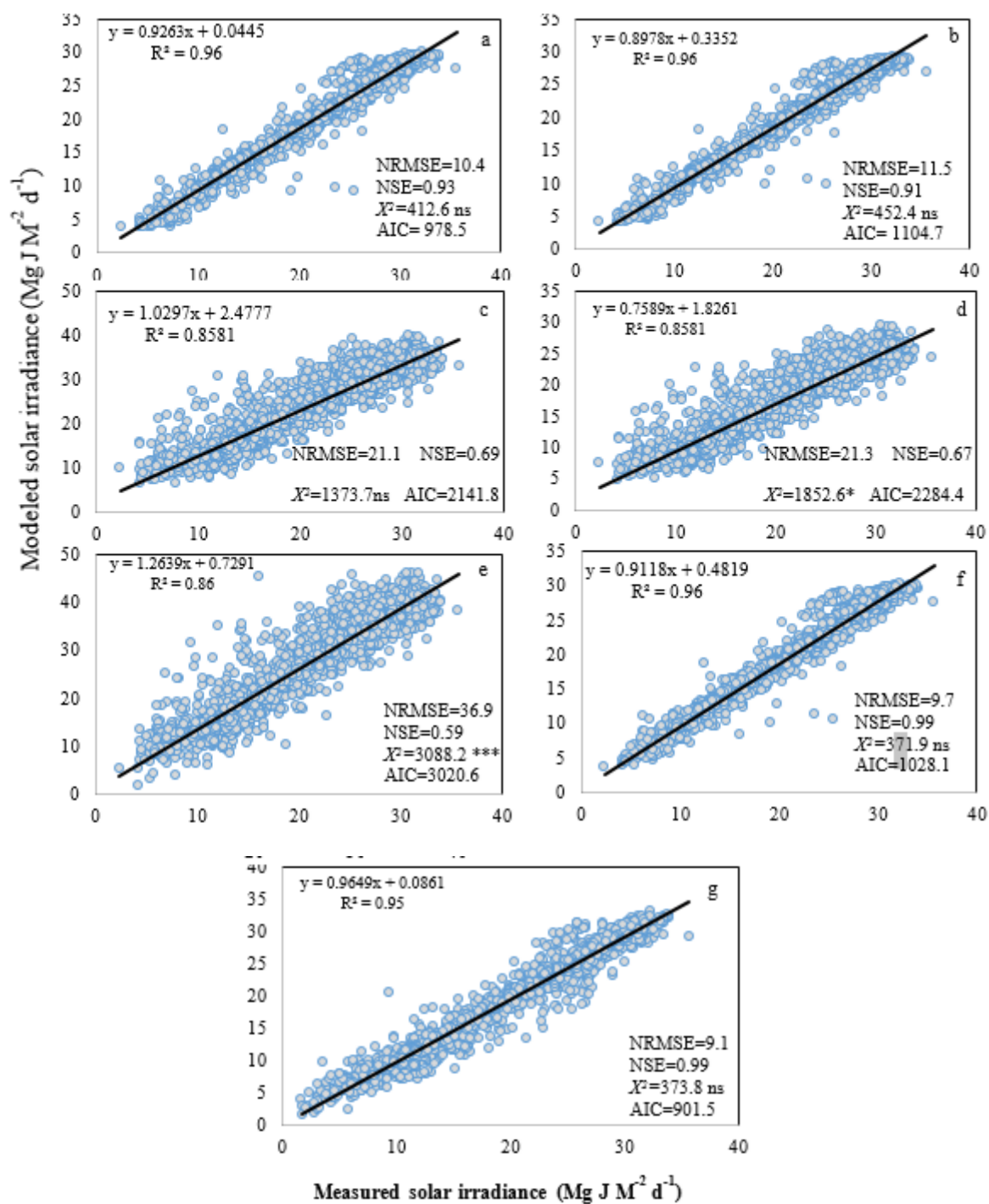
همانگونه که نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد دقت برآورد تابش با استفاده مدل‌های مختلف بر دقت مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه گندم و تبخیر و تعرق در طول دوره رشد آن نیز موثر است. نتایج به دست آمده نشان داد که در کل منطقه مورد مطالعه کمترین اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های تابش مشاهده شده و داده‌های تابش تخمین زده شده به ترتیب مربوط به مدل پاور (۱/۸ درصد)، مدل آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده (۳/۳۶ درصد)، مدل آنگستروم-پرسکات با ضرایب پیشنهادی فائو (۳/۴۲ درصد)، مدل کرمانی (۳/۴۵ درصد)، مدل هارگریوز-سامانی کالیبره‌شده (۷/۳۶ درصد) و هارگریوز-سامانی پیشنهادی توسط فائو (۱۱/۶۵ درصد) و هانت (۱۲/۵۲ درصد) است. نتایج آزمون *t* هم نشان داد که اختلاف عملکرد دانه گندم شبیه‌سازی شده با استفاده از تابش تخمین زده شده با مدل‌های پاور، کرمانی و آنگستروم-پرسکات اختلاف معنی‌داری با عملکرد شبیه‌سازی شده با مقادیر تابش واقعی در کل منطقه مورد مطالعه ندارد (جدول ۲). به علاوه در کل منطقه مورد مطالعه، مقایسه بین تبخیر و تعرق برآورد شده با استفاده از داده‌های تابش واقعی و تابش تخمینی حاصل از مدل‌های مختلف نشان داد که کمترین اختلاف به ترتیب مربوط به مدل‌های پاور (۲/۵ درصد)، آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده (۳/۴۵ درصد)، مدل آنگستروم-پرسکات با ضرایب پیشنهادی فائو (۳/۸۵ درصد)، مدل کرمانی (۴/۰۱ درصد)، هارگریوز-سامانی پیشنهادی توسط فائو (۸/۸ درصد)، مدل هارگریوز-سامانی کالیبره‌شده (۱۳/۳ درصد) و هانت (۲۹/۳ درصد) است. لازم به ذکر است که در کل منطقه مورد مطالعه تنها، اختلاف تبخیر و تعرق برآورد شده با استفاده از تابش تخمینی توسط مدل پاور اختلاف معنی‌داری با تبخیر و تعرق برآورد با مقادیر تابش واقعی نداشت. همچنین در سه منطقه از چهار منطقه مورد مطالعه نیز تبخیر و تعرق برآورد شده با استفاده از داده‌های تابش مدل کرمانی و آنگستروم-پرسکات اختلاف معنی‌داری با تبخیر و تعرق برآورد شده با استفاده از داده‌های تابش واقعی نداشت.

Perdinan *et al.* (2020) گزارش کردند که عملکرد و تبخیر و تعرق برآورد شده در فصل رشد سویا در شرایطی که از داده‌های تابش مدل پاور استفاده شده بود در مقایسه با سایر مدل‌ها از جمله مدل هانت همبستگی بالاتری با مقادیر برآورد شده آنها با استفاده از داده‌های تابش واقعی داشت. به علاوه این پژوهشگران گزارش کردند که دقت تخمین تابش توسط مدل‌ها تفاوت چشمگیری دارند، از طرفی دقت تخمین میزان تابش در ماه‌های مختلف سال نیز تا حدی در بین مدل‌های مختلف متفاوت بود. در مطالعه‌ای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نیز گزارش شد که برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تابش برآورد شده توسط مدل هارگریوز-سامانی

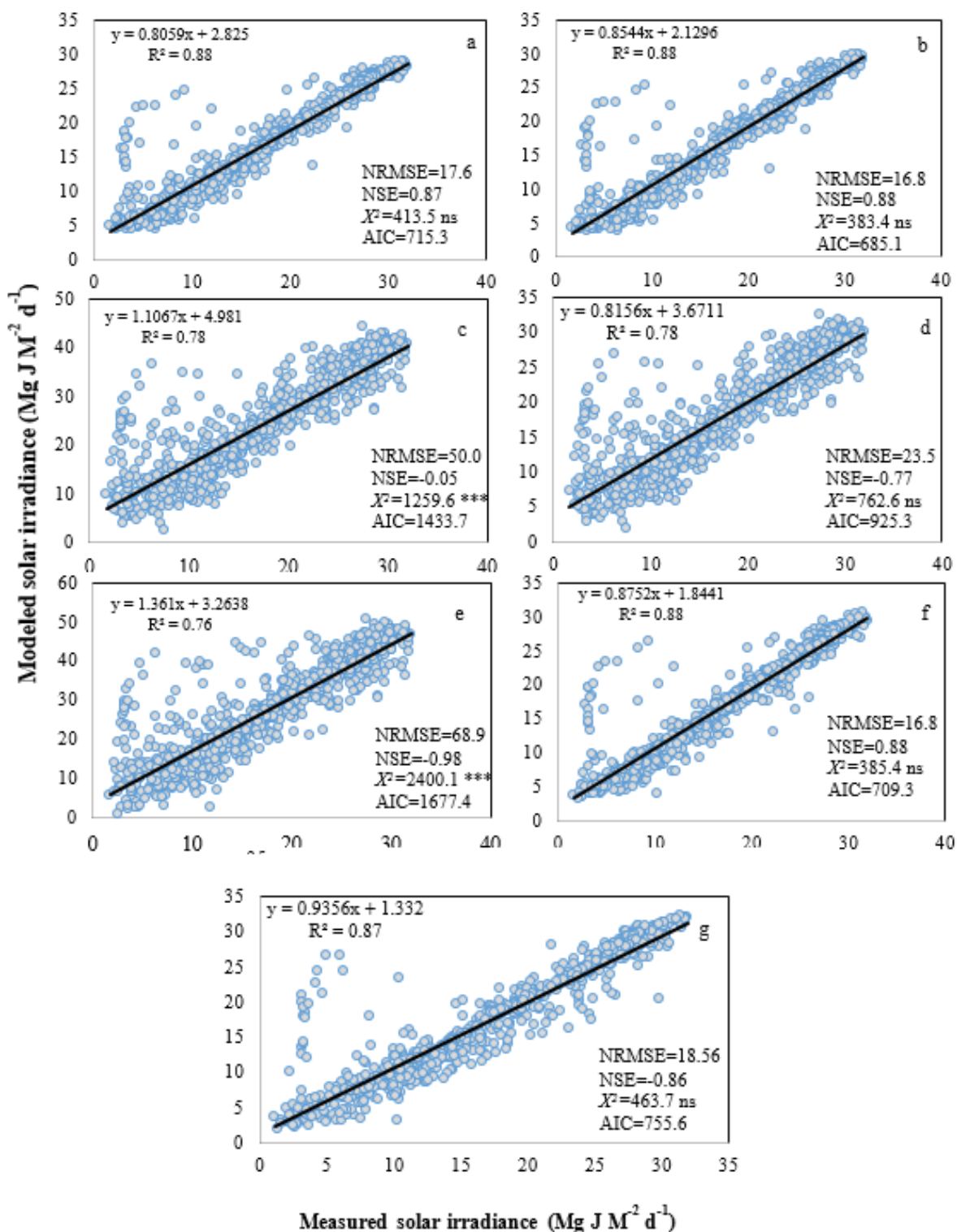
و مدل سامانی نسبت به مدل آنگستروم-پرسکات دقت کمتری داشت (Behmanesh et al., 2017). Qian et al. (2019) گزارش کردند که اختلاف معنی‌داری بین دقت برآورد تابش بین مدل‌های مختلف تخمین تابش وجود دارد و عملکرد گندم بهاره و کلزای پاییزه شبیه‌سازی شده با استفاده از داده‌های تابش مدل DS (De Jong & Stewart, 1993) نسبت به سایر مدل‌ها از جمله مدل هانت و هارگریوز-سامانی کمترین اختلاف را با عملکردهای شبیه‌سازی شده با استفاده از تابش واقعی داشت.



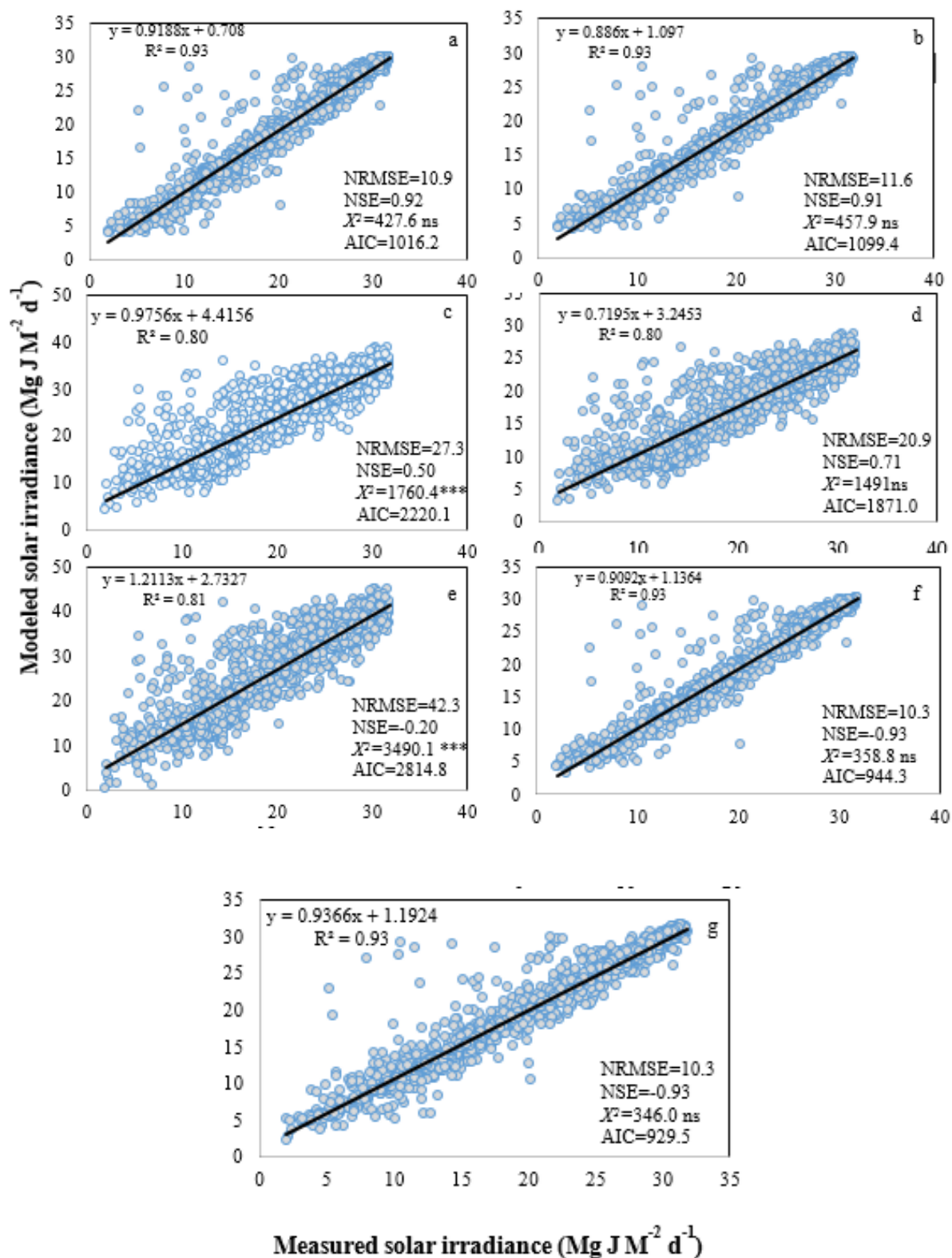
شکل ۴. رابطه بین مقدار تشعشع اندازه‌گیری شده و برآورد شده در مرحله صحت‌سنجی توسط مدل‌های آنگستروم-پرسکات کالیبره شده (الف)، آنگستروم-پرسکات با ضرایب فاو (ب)، هارگریوز-سامانی کالیبره شده (ج)، هارگریوز-سامانی با ضرایب فاو (د)، هانت (و)، کرمانی (ه) و پاور (ی) در ایستگاه مشهد در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱.



شکل ۵. رابطه بین مقدار تشعشع اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده توسط مدل‌های آنگستروم-پرسکات کالیبره‌شده (الف)، آنگستروم-پرسکات با ضرایب فاو (ب)، هارگریوز-سامانی کالیبره‌شده (ج)، هارگریوز-سامانی با ضرایب فاو (د)، هانت (و)، کرمانی (ه) و پاور (ی) در ایستگاه سبزوآر در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱.



شکل ۶. رابطه بین مقدار تشعشع اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل‌های آنگستروم-پرسکات کالیبره شده (الف)، آنگستروم-پرسکات با ضرایب فاو (ب)، هارگریوز-سامانی کالیبره شده (ج)، هارگریوز-سامانی با ضرایب فاو (د)، هانت (و)، کرمانی (ه) و پاور (ی) در ایستگاه قوچان در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹.



شکل ۷. رابطه بین مقدار تشعشع اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل‌های آنگستروم-پرسکات کالیبره شده (الف)، آنگستروم-پرسکات با ضرایب فائو (ب)، هارگریوز-سامانی کالیبره شده (ج)، هارگریوز-سامانی با ضرایب فاو (د)، هانت (و)، کرمانی (ه) و پاور (ی) در ایستگاه گناباد در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱.

جدول ۲. نتایج آزمون t برای مقایسه عملکرد دانه گندم و تخریب و تعرق شبیه‌سازی شده توسط مدل CERES-Wheat با ورودی تابش اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده توسط مدل‌های مختلف در خراسان رضوی.

| | Yield | | | | ET | | | |
|----------------|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| | Mashhad | Sabzevar | Quchan | Gonabad | Mashhad | Sabzevar | Quchan | Gonabad |
| Measured | 7465.2 | 8942.0 | 7396.7 | 8370.8 | 462.0 | 522.7 | 538.2 | 477.8 |
| Angstrom | 7518.6ns (53.4) | 8351.6ns (-590.4) | 7550.7ns (154) | 8032.0ns (-338.8) | 459.2ns (-2.9) | 474.7** (-48.0) | 544.7ns (6.5) | 464.5ns (-13.3) |
| Angstrom-FAO | 7499.4ns (34.2) | 8314ns (-628) | 7541.3ns (144.7) | 8012.8ns (-358) | 470.8ns (8.7) | 472.5** (-50.2) | 543.1ns (4.9) | 463.5ns (-14.3) |
| Hargreaves | 6881.6ns (-583.6) | 9273ns (331) | 8030ns (633.3) | 9153.2* (782.4) | 435.2ns (-26.8) | 632.3*** (109.6) | 600.9ns (62.7) | 548.3* (70.5) |
| Hargreaves-FAO | 5162.4** (-2302.8) | 8233.6* (-708.4) | 7742.3ns (345.7) | 8107.0ns (-263.8) | 382.7* (79.4) | 473.3** (-49.4) | 563.5ns (25.3) | 458.6ns (-19.3) |
| Hunt | 8501ns (1035.8) | 9274.2ns (332.2) | 9168.3* (1771.7) | 9085.2* (714.4) | 596.3** (134.2) | 676.7*** (154.0) | 740.2** (202) | 579.4** (101.6) |
| Kirmanian | 7362.2ns (-103) | 8541ns (-401.0) | 7802.3ns (405.7) | 8165.6ns (-205.2) | 455.8ns (-6.2) | 480.5* (-42.2) | 563.9ns (25.8) | 469.0ns (-8.8) |
| Power | 7674ns (208.8) | 8776.6ns (-165.4) | 7568.7ns (172) | 8383.6ns (12.8) | 474.9ns (12.8) | 494.3ns (-28.4) | 545.9ns (7.8) | 480.2ns (2.4) |

The numbers in parentheses indicate the difference between simulated traits when the crop model used estimated radiation as input compared to when measured radiation was used.

ns indicates no significance and ***, **, * indicates significance at P levels of 0.001, 0.01, and 0.05, respectively.

۴. نتیجه‌گیری

در مجموع می‌توان گفت که مدل‌های هارگریوز-سامانی و هانت برای تخمین تابش در خارج از بازه زمانی و منطقه واسنجی، قابلیت تخمین دقیق تابش خورشیدی را نداشته و به هیچ عنوان استفاده از آنها برای تخمین تابش برای استفاده در مدل‌های شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهی و همچنین تخمین نیاز آبی گیاهان توصیه نمی‌شود. با توجه به دقت مدل پاور و قابلیت دسترسی راحت به داده‌های آن برای هر نقطه مکانی در سطح استان از طریق وب‌سایت، بهترین گزینه برای استفاده در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی است. از طرفی می‌توان بیان کرد که مدل آنگستروم-پرسکات که در برنامه Weatherman نیز از آن برای تخمین تابش استفاده می‌شود و همچنین مدل کرمانی، قابلیت برآورد قابل قبولی از تابش برای استفاده در شبیه‌سازی‌های رشد و نمو گیاهی ارایه می‌دهند.

۵. سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده از محل اعتبارات پژوهشی مجتمع آموزش عالی کشاورزی و دامپروری تربت‌جام می‌باشد که بدین وسیله از معاونت پژوهشی مجتمع تقدیر و تشکر می‌شود.

۶. منابع

- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T.A., Itenfisu, D., & Jensen, M.E. (2005). The ASCE standardized reference evapotranspiration equation, Idaho, Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI Task Committee Report.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy, pp. 300.
- Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50, 121-125.
- Archontoulis, S.V., & Miguez, F.E. (2015). Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agronomy Journal*, 107, 786-798.
- Behmanesh, J., Mehdizadeh, S., Aligholinia, T., & Rasouli Majd, N. (2017). Evaluation of solar radiation estimation models in estimating reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 40, 119-129. (In Persian).
- Ball, R.A., Purcell, L.C., & Carey, S.K. (2004). Evaluation of solar radiation prediction models in North America. *Agronomy Journal*, 96, 391-397.

- Burnham, K.P., & Anderson, D.R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach* (2th ed.). Springer Science & Business Media. Colorado State University Fort Collins, CO 80523-1484, USA.
- De Jong, R., & Stewart, D.W. (1993). Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 73, 509–518.
- Goodin, D.G., Hutchinson, J.M.S., Vanderlip, R.L., Knapp, M.C., & Goodin, D.G. (1999). Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data. *Agroclimatology*, 91, 845–851.
- Gupta, S.K., Stackhouse Jr., P.W., Cox, S.J., Mikovitz, J.C., & Zhang, T. (2006). 22-year surface radiation budget data set. *GEWEX News*, 16, 12–13.
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108, 223–230.
- Heiniger, R.W., Vanderlip, R.L., Williams, J.R., & Welch, S.W. (1997). Developing guidelines for replanting grain sorghum: III. Using a plant growth model to determine replanting options. *Agronomy Journal*, 89, 93–100.
- Hunt, L.A., Kuchar, L., & Swanton, C.J. (1998). Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, 293-300.
- Jahani, B., Dinpashoh, Y., & Raisi Nafchi, A. (2017). Evaluation and development of empirical models for estimating daily solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 878–891.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijssman, A.J., & Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235–265.
- Khorasanizadeh, H., & Mohammadi, K. (2013). Introducing the best model for predicting the monthly mean global solar radiation over six major cities of Iran. *Energy*, 51, 257–266.
- Kirmanian, S., Jamil, M., & Rizwan, M. (2015). Empirical correlation of estimating global solar radiation using meteorological parameters. *International Journal of Sustainable Energy*, 34, 327–39.
- Liu, D.L., & Scott, B.J. (2021). Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 41–59.
- Mianabadi, A., Eghtedari, M., & Faridhosseini, A. (2012). Calibration of two solar radiation models and development of two one-parametric solar radiation models based on the cloudiness in Mashhad, Iran. *Journal of Climatology Research*, 11, 53-64. (In Persian).
- Mousavi-Baygi, M., Ashraf, B., & Miyanabady, A. (2010). The investigation of different models of estimating solar radiation to recommend the suitable model in a semi-arid climate. *Journal of Water and Soil*, 24, 836-844. (In Persian).
- NASA. (2019). *Power Data Methodology*. Retrieved October 6, 2021, from <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology>.
- Page, J. (2018). The role of solar-radiation climatology in the design of photovoltaic systems. In: S.A. Kalogirou (Ed), *McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications* (pp. 601–670.) Academic Press, USA.
- Perdinan, A., Winkler, J.A., & Andresen, J.A. (2021). Evaluation of multiple approaches to estimate daily solar radiation for input to crop process models. *Atmosphere*, 12, 1–24.
- Prescott, J.A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 64, 114–118.
- Prieto, J.I., & García, D. (2022). Global solar radiation models: A critical review from the point of view of homogeneity and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111856.
- Qian, B., Jing, Q., Zhang, X., Shang, J., Liu, J., Wan, H., Dong, T., & de Jong, R. (2019). Adapting estimation methods of daily solar radiation for crop modelling applications in Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 99, 533–547.
- Saberali, S.F., Shirmohammadi-Aliakbarkhani, Z., & Nastari Nasrabadi, H. (2022). Simulating winter wheat production potential under near-future climate change in arid regions of northeast Iran. *Theoretical and Applied Meteorology*, 148, 1217–1238.
- Samani, Z. (2000). Estimation solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126, 265-267.
- Shirmohammadi-Aliakbarkhani, Z., & Shojaei, R. (2019). Evaluate and comparative of daily solar radiation models in Ahvaz City. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 1, 343-350. (In Persian).
- Vesely, F.M., Paleari, L., Movedi, E., Bellocchi, G., & Confalonieri, R. (2019). Quantifying uncertainty due to stochastic weather generators in climate change impact studies. *Scientific Reports*, 9, 9258.
- 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.