


The capability of some global solar radiation empirical models as the input of the other hydro-climatic processes

Khoshkhoo, Y.¹ 

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
E-mail: y.khoshkho@uok.ac.ir

(Received: 13 Feb 2022, Revised: 20 April 2022, Accepted: 4 Oct 2022, Published online: 14 June 2023)

Summary

The extent of the energy received from the sun to the earth is one of the main and important input parameters in the agricultural, ecological, hydrological, climatological, and environmental models. It has also a key role in most processes related to the soil-plant-atmosphere system such as net radiation, reference evapotranspiration, soil temperature, moisture, and snow melt. In this research, the efficiency of three categories of the global radiation empirical models including sunshine-based, air temperature-based, and cloudiness-based models was evaluated during the 1997-2021 period for the Sanandaj synoptic station and after these model's calibration procedure, the better models were recognized. By adopting the estimated global radiation by better models as the input of modeling some processes including net radiation, reference evapotranspiration, soil temperature, and moisture and snow melt, the model outputs were compared with the case that the measured global radiation had been adopted as these models input. After the calibration of global radiation models and optimizing the empirical parameters of them, which were performed based on minimizing the RMSE index between the left and right sides of these equations, finally, three models including Angstrom-Preseott model, the Bristow-Campbell model, and the Black model were selected as the representative of each of the three mentioned categories.

In the next step, cross validation was applied to these three models based on the MAE, MBE, R^2 and R_{eff} indices. The results showed a reasonable agreement between the measured and estimated global radiation based on all of these three selected models. The MAE index for Angstrom-Preseott, Bristow-Campbell, and Black models was 138.5, 227.14, and 251.3 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, respectively which can be considered as the acceptable extent. The MBE index led to obtaining good results with no considerable bias for Angstrom-Preseott model ($-3.9 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) and the Bristow-Campbell model ($+11.9 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) but a positive overestimating bias using the Black model ($+159 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$). For all three models, the R^2 and R_{eff} were respectively greater than 0.83 and 0.78 values. The best values of these two indices were obtained for the Angstrom-Preseott model.

Regarding comparison of the outcome of estimated and measured global radiation when applying as the input of some models, the histogram of the errors (the difference between outputs of some of the processes models based on the estimated and measured global radiation inputs) for net radiation calculation showed the error range mostly from -50 to $+50 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ for all of the three global radiation model inputs, which as seemed to be a narrow difference between these two cases. For reference evapotranspiration calculation, the histogram of errors was mainly between very low values of -0.2 to $0.1 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ for all of the three global radiation models. Regarding 1 temperature modeling, the Angstrom-Preseott model (with error range between -0.5 to $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$) showed a better performance than the Bristow-Campbell and Black models (with error range between -1 to $1 \text{ }^\circ\text{C}$). For soil moisture modeling, the Angstrom-Preseott model showed very suitable performance with the most error values close to zero and the Bristow-Campbell and Black models showed relatively suitable and similar performance. The snow modeling performed based on some few snowy days, the Angstrom-Preseott model with focusing the histogram error between -2 to 0.5 cm can be considered as the best model and the Bristow-Campbell and Black models showed similar but not as good performance.

On the whole, the results indicated that the appropriate outcomes were obtained when applying the global radiation estimated by Angstrom-Preseott model as the input of all of the processes models. Regarding Bristow-Campbell and Black methods, which led to obtaining relatively similar results, applying them as the inputs of different models led to a diversity of results including very appropriate (for reference evapotranspiration), appropriate (for net radiation), relatively appropriate (soil temperature and moisture) and not-appropriate (for snow).

Keywords: Angstrom model, Reference Evapotranspiration, Coup Model, Soil Temperature, Snowmelt, Net Radiation.

Cite this article: Khoshkhoo, Y. (2023). The capability of some global solar radiation empirical models as the input of the other hydro-climatic processes. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(1), 137-152. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2022.338970.1007404>

بررسی توانمندی مدل‌های تجربی برآورد تابش کلی خورشید به عنوان ورودی سایر فرایندهای هیدروکلیمایی

یونس خوشخو^۱

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: y.khoshkho@uok.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۱/۱/۳۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۷/۱۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۳/۲۴)

چکیده

در این تحقیق کارایی سه دسته مدل تجربی برآورد شدت تابش شامل دسته مدل‌های مبتنی بر ساعات آفتابی، دمای هوا و ابرناکی در مقیاس روزانه و در دوره آماری ۱۹۹۷-۲۰۲۱ برای ایستگاه سینوپتیک سنندج مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از واسنجی این مدل‌ها و استخراج مدل‌های برتر، از مقادیر برآورد شده شدت تابش به عنوان متغیر ورودی در مدل‌سازی فرایندهای مختلف استفاده شد و با حالتی که از داده‌های اندازه‌گیری شده شدت تابش به عنوان متغیر ورودی در مدل‌سازی این فرایندها استفاده شود، مورد مقایسه قرار گرفت. پس از انجام واسنجی مدل‌ها در نهایت سه مدل انگستروم-پرسکات، بریستو-کمپل و بلک به عنوان مدل‌های برتر و نماینده هر کدام از سه دسته مذکور انتخاب شدند. نتایج اعتبارسنجی این مدل‌ها نشان داد که تطابق مناسب و قابل قبولی بین مقادیر اندازه‌گیری شده شدت تابش و مقادیر برآورد شده آن با به کارگیری هر سه مدل وجود دارد به گونه‌ای که شاخص میانگین قدر مطلق خطا برای این سه مدل به ترتیب برابر با ۱۳۸/۵، ۲۲۷/۱۴ و ۲۵۱/۳ کیلوژول بر مترمربع بر روز به دست آمد. نتایج همچنین نشان داد که به کارگیری مدل انگستروم و استفاده از شدت تابش برآورد شده توسط آن به عنوان متغیر ورودی همه فرایندهای تابش خالص، تبخیر تعرق مرجع، ذوب برف، دما و رطوبت خاک منجر به حصول نتایج مناسبی خواهد شد و در کلیه فرایندهای مذکور، مدل انگستروم بهترین عملکرد را داشت. در ارتباط با دو مدل بریستو - کمپل و بلک که عملکردی نزدیک به هم از خود نشان دادند به هنگام به کارگیری شدت تابش برآورد شده توسط آن‌ها به عنوان متغیر ورودی ۵ فرایند مورد مطالعه در این تحقیق، بهترین عملکرد این دو مدل به ترتیب برای شبیه‌سازی تبخیر تعرق مرجع، تابش خالص، دما و رطوبت خاک و ذوب برف به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: مدل انگستروم، تبخیر تعرق مرجع، مدل Coup، دمای خاک، ذوب برف، تابش خالص.

۱. مقدمه

شبکه‌های آبیاری و برنامه‌ریزی دور آبیاری به حساب می‌آید (رودری و زندپارسا، ۱۳۹۳؛ ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹؛ پریستو و گارسیا، ۲۰۲۱). شدت تابش خورشید در ایستگاه‌های هواشناسی به‌طور معمول توسط دستگاهی به نام پیرانومتر (سولاریمتر) اندازه‌گیری می‌شود. در بین عوامل مختلف هواشناسی که در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند شدت تابش جزو آن دسته عواملی است که هم به‌طور محدودتر و هم توأم با خلأهای آماری بالا اندازه‌گیری شده است و طول دوره آماری آن نیز غالباً به اندازه کافی طولانی نیست. از این رو، در تحقیقات متعددی به برآورد این متغیر مهم با به کارگیری روش‌های مختلف تجربی (نظیر روش انگستروم - پرسکات)، آماری (نظیر شبکه عصبی)، سنجش از دور و ... پرداخته شده است. از جمله مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته در

میزان انرژی رسیده از خورشید به سطح زمین یکی از متغیرهای ورودی اصلی و مهم در مدل‌های مرتبط با علوم مختلف کشاورزی، اکولوژیکی، هیدرولوژی، اقلیمی، زیست‌محیطی و ... است. شدت تابش خورشید نقشی کلیدی در شبیه‌سازی غالب فرایندهای مرتبط با سیستم خاک-گیاه- جو ایفاء می‌کند (آقاشریعتمداری و همکاران، ۱۳۹۰؛ لی و همکاران، ۲۰۱۳) که از جمله مهم‌ترین این فرایندها می‌توان از تابش خالص، تبخیر تعرق گیاهان، دما و رطوبت خاک و ذوب برف نام برد (سبزی پرور و همکاران، ۱۳۸۷). شدت تابش همچنین متغیری مهم در مباحث مربوط به آسایش اقلیمی، معماری ساختمان، مهندسی انرژی و طراحی سامانه‌های حرارتی خورشیدی بوده و یکی از عوامل تعیین‌کننده در میزان فتوسنتز گیاهان، رشد و توسعه گیاهان و همچنین طراحی

شده است. یوراکا و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی مدل‌های مختلف برآورد شدت تابش مبتنی بر طول ساعات آفتابی، دمای هوا و ترکیب متغیرهای مختلف هواشناسی برای بخش‌هایی از شمال اسپانیا به این نتیجه رسیدند که مدل‌های پیچیده‌تر لزوماً منجر به حصول نتایج با دقت بالاتر نمی‌شوند. آن‌ها در نهایت یک مدل تعدیل‌یافته و به‌روز شده مبتنی بر دمای هوا را به‌عنوان مدل منتخب برگزیدند.

در راستای پژوهش‌های مذکور، در این تحقیق کارایی سه دسته مدل تجربی برآورد شدت تابش شامل مدل‌های مبتنی بر طول ساعات آفتابی، مدل‌های مبتنی بر دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا و مدل‌های مبتنی بر ابرناکی در مقیاس روزانه و در یک دوره آماری ۲۵ ساله مورد ارزیابی قرار گرفته است و پس از واسنجی این مدل‌ها و استخراج مدل‌های برتر، با توجه به نقش کلیدی شدت تابش به‌عنوان یک متغیر ورودی اصلی در مدل‌سازی فرایندهایی نظیر تابش خالص، تبخیر تعرق مرجع، ذوب برف و دما و رطوبت خاک، از مقادیر برآوردشده شدت تابش به‌عنوان متغیر ورودی در مدل‌سازی این فرایندها استفاده شده است و با حالتی که از داده‌های اندازه‌گیری‌شده شدت تابش به‌عنوان متغیر ورودی در مدل‌سازی این فرایندها استفاده شود مورد مقایسه و سنجش قرار گرفته است.

۲. داده‌ها و روش تحقیق

۲-۱. ایستگاه مورد مطالعه

ایستگاه سینوپتیک سنندج به طول جغرافیایی $37^{\circ} 0'$ شرقی، عرض جغرافیایی $35^{\circ} 20'$ شمالی و ارتفاع ۱۳۷۳ متر از تراز سطح دریا واقع در استان کردستان برای انجام این پژوهش انتخاب شد. معیار انتخاب این ایستگاه کیفیت مناسب داده‌های شدت تابش از یک سو و موجود بودن آمار شدت تابش در یک دوره آماری نسبتاً طولانی‌مدت (حدود ۲۵ سال) بود. اگرچه این ایستگاه در سال ۱۹۶۰ تأسیس شده است اما داده‌های شدت تابش آن که توسط

ایران می‌توان از خلیلی و رضایی صدر (۱۳۷۶)، قهرمان و بختیاری (۲۰۰۹) و آقاشریعتمداری و همکاران (۱۳۹۰) و جانباز قبادی (۱۳۹۶) در به‌کارگیری روش‌های تجربی، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹) و سبزی پرور و همکاران (۱۳۹۸) در به‌کارگیری روش‌های آماری و صداقت مصعبی و همکاران (۱۳۹۸) و احمدی باصری و همکاران (۱۳۹۹ الف) در به‌کارگیری روش‌های مبتنی بر سنجش از دور نام برد. برخی تحقیقات دیگر پیرامون شدت تابش خورشید در ایران نیز معطوف به مباحثی نظیر شبیه‌سازی واداشت تابشی ناشی از هواویزها در مقیاس‌های منطقه‌ای (مشایخی و همکاران، ۱۳۸۹) و جهانی (عطایی و همکاران، ۱۳۹۵) و ارزیابی شبکه جهانی GLDAS جهت برآورد تابش روزانه در ایران احمدی باصری و همکاران (۱۳۹۹ ب) بوده است. در این میان، مدل‌های تجربی برآورد شدت تابش که غالباً مبتنی بر وجود ارتباط بین شدت تابش با متغیرهایی نظیر طول ساعات آفتابی، ابرناکی، دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا و ... هستند و در قالب مدل‌های مختلف خطی (آنگستروم، ۱۹۲۴؛ پرسکات، ۱۹۴۰)، نمایی (برستو و کمپل، ۱۹۸۴)، توانی (بلک، ۱۹۵۶؛ هارگریوز و همکاران، ۱۹۸۵)، سینوسی (تکه و ییلدیریم، ۲۰۱۴) و ... ارائه شده‌اند، توجه محققان بیشتری را به خود معطوف کرده است. بشارت و همکاران (۲۰۱۳) مدل‌های تجربی برآورد شدت تابش را بسته به نوع متغیرهای ورودی آن‌ها در ۴ طبقه مختلف شامل مدل‌های مبتنی بر طول ساعات آفتابی، مدل‌های مبتنی بر ابرناکی، مدل‌های مبتنی بر دمای هوا و مدل‌های مبتنی بر ترکیبی از متغیرهای مختلف هواشناسی دسته‌بندی کرده‌اند. چوکووجیندور (۲۰۱۷) با ارائه یک مرور جامع از فرم‌های مختلف مدل‌های تجربی برآورد شدت تابش، به ۴ دسته مذکور، مدل‌های مبتنی بر رطوبت نسبی و مدل‌های مبتنی بر بارش را نیز افزوده‌اند و چنین اظهار داشته‌اند که در قاره آفریقا، در اکثریت موارد (در ۷۱/۸۶ درصد از کل تحقیقات انجام شده) از مدل‌های مبتنی بر طول ساعات آفتابی جهت برآورد شدت تابش استفاده

دستگاهی به نام پیرانومتر اندازه‌گیری می‌شود از سال ۱۹۹۷ به بعد در دسترس هستند.

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

داده‌های هواشناسی مورد نیاز جهت انجام این تحقیق شامل شدت تابش خورشید (بر حسب کیلوژول بر مترمربع بر روز)، طول ساعات آفتابی (بر حسب دقیقه)، مقادیر حداقل و حداکثر شبانه‌روزی دمای هوا (بر حسب درجه سانتی‌گراد)، بارش (بر حسب میلی‌متر)، سرعت باد (بر حسب متر بر ثانیه)، ابرناکی (بر حسب درصد پوشش ابر در آسمان)، رطوبت نسبی (بر حسب درصد)، عمق برف (بر حسب سانتی‌متر) و دمای خاک (بر حسب درجه سانتی‌گراد) در مقیاس روزانه از سازمان هواشناسی کشور تهیه شدند و پس از کنترل کیفی و حذف داده‌های مشکوک، از آن‌ها جهت انجام این تحقیق استفاده شد. با توجه به اینکه داده‌های مشکوک و اشتباه عمده‌تاً مربوط به داده‌های شدت تابش بودند و داده‌های این متغیر در مقایسه با سایر متغیرهای هواشناسی از خطاهای بیشتری به هنگام اندازه‌گیری برخوردارند لذا کنترل کیفی این داده‌ها و حذف داده‌های اشتباه با مقایسه بین مقادیر شدت تابش اندازه‌گیری شده در سطح زمین با مقادیر شدت تابش در بالای جو (تابش فرازمینی) انجام شد و در مواردی که شدت تابش در سطح زمین بیشتر از شدت تابش در بالای جو بود چنین داده‌هایی حذف شدند. در بازه زمانی ۱۹۹۷/۱۱/۱ تا ۲۰۲۱/۷/۳۱ از داده‌های اندازه‌گیری شده طول ساعات آفتابی، مقادیر حداقل و حداکثر شبانه‌روزی دمای هوا و ابرناکی همراه با داده‌های شدت تابش جهت فرایند‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های مختلف برآورد شدت تابش استفاده شد. در بازه زمانی ۲۰۲۱/۸/۱ تا ۲۰۲۲/۱/۳۱ نیز از متغیرهای مختلف هواشناسی شامل دماهای حداقل و حداکثر هوا، طول ساعات آفتابی، سرعت باد، رطوبت نسبی و بارش همراه با داده‌های شدت تابش جهت شبیه‌سازی فرایند‌های تابش خالص، تبخیر تعرق مرجع، ذوب برف، دمای خاک و رطوبت خاک

استفاده به عمل آمد. این بازه زمانی ۶ ماهه اخیر به گونه‌ای انتخاب شد که از داده‌های این بازه در فرایند واسنجی مدل‌های شدت تابش استفاده نشده باشد. در کنار داده‌های هواشناسی مذکور، برخی ویژگی‌های خاک نظیر بافت خاک و چگالی ظاهری خاک نیز که برای مدل‌سازی دمای خاک، رطوبت خاک و ذوب برف مورد نیاز بودند بکار گرفته شدند.

۲-۳. مدل‌های برآورد شدت تابش

مدل‌های برآورد شدت تابش در این تحقیق به گونه‌ای انتخاب شدند که ضمن متنوع بودن به لحاظ فرم کلی مدل (خطی، نمایی، سینوسی و ...)، داده‌های ورودی مورد نیاز آن‌ها نیز دارای تنوع باشد تا در سطوح مختلفی از موجودیت داده‌های هواشناسی امکان برآورد شدت تابش میسر شود. در جدول ۱ فرم کلی معادلات مربوط به مدل‌های مختلفی که در این تحقیق از آن‌ها استفاده شده است آورده شده است. همان‌گونه که از این جدول پیداست این مدل‌ها به سه دسته کلی شامل مدل‌های مبتنی بر طول ساعات آفتابی (به تعداد ۱۰ مدل)، مدل‌های مبتنی بر دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا (به تعداد ۷ مدل) و مدل مبتنی بر ابرناکی (۱ مدل) قابل تقسیم‌بندی هستند. جهت استفاده از این مدل‌ها لازم است که ضرایب تجربی (پارامترهای) متعددی که در ساختار این مدل‌ها وجود دارد (ضرایب b_0 ، b_1 ، b_2 و b_3) بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده شدت تابش مورد واسنجی قرار گیرند. فرایند واسنجی این ضرایب تجربی در هر کدام از معادلات فوق بر این اساس است که با تغییر دادن مداوم آن‌ها، در نهایت کمترین اختلاف بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده شدت تابش حاصل آید. دستیابی به این امر با معیار به حداقل رساندن شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محقق شد. از این شاخص در تحقیقات دیگری از جمله خوشخو و همکاران (۱۳۸۸) جهت بهینه‌سازی مدل استفاده شده است.

جدول ۱. فرم‌های کلی مدل‌های برآورد شدت تابش خورشید انتخاب شده در این تحقیق.

نوع مدل	معادله کلی مدل	شماره معادله	منبع	معرفی متغیرهای مدل‌ها
دسته اول (مدل‌های مبتنی بر طول ساعات آفتابی)	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * n/N$	۱	آنگستروم (۱۹۲۴)؛ پرسکات (۱۹۴۰)	n و N: به ترتیب طول ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده و حداکثر ساعات آفتابی ممکن R _s و R _a : به ترتیب شدت‌های تابش روزانه دریافتی بر سطح افقی در سطح زمین و در بالای جو (تابش فرازمینی) برحسب مگا ژول بر مترمربع بر روز ΔT: دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا (T _{max} - T _{min}) بر حسب درجه سانتیگراد C: میانگین ابرناکی برحسب دهک b ₀ , b ₁ , b ₂ و b ₃ ضرایب تجربی
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * n/N + b_2 * (n/N)^2$	۲	اوگلمان و همکاران (۱۹۸۴)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * n/N + b_2 * (n/N)^2 + b_3 * (n/N)^3$	۳	باهل (۱۹۸۷)	
	$R_s/R_a = b_0 * \exp(b_1 * n/N)$	۴	الجیب و مانسل (۲۰۰۰)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * \exp(n/N)$	۵	آلموروکس و هونتوریا (۲۰۰۴)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * n/N + b_2 * \exp(n/N)$	۶	باکرکی (۲۰۰۹)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1/R_a + b_2 * (n/N)/R_a$	۷	طغرل و اونات (۱۹۹۹)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * (n/N)^{b_2}$	۸	الجیب و مانسل (۲۰۰۰)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * \exp(n/N) + b_2 * n/N$	۹	باکرکی (۲۰۰۹)	
	$R_s/R_a = b_0 * \sin(b_1 * n/N + b_2)$	۱۰	تکه و بیلدیریم (۲۰۱۴)	
دسته دوم (مدل‌های مبتنی بر دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا)	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * \Delta T/N$	۱۱	گارسیا (۱۹۹۴)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * \Delta T/N + b_2 * (\Delta T/N)^2$	۱۲	گارسیا (۱۹۹۴)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * \Delta T/N + b_2 * (\Delta T/N)^2 + b_3 * (\Delta T/N)^3$	۱۳	گارسیا (۱۹۹۴)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * \log(\Delta T/N)$	۱۴	گارسیا (۱۹۹۴)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * (\Delta T)^{0.5}$	۱۵	هارگریوز و همکاران (۱۹۸۵)	
	$R_s/R_a = b_0 * (1 - \exp(-b_1 * (\Delta T)^{0.5} - b_2 * \Delta T - b_3 * (\Delta T)^2))$	۱۶	هانت و همکاران (۱۹۹۸)	
	$R_s/R_a = b_0 * (1 - \exp(-b_1 * (\Delta T)^{b_2}))$	۱۷	برستو و کمپل (۱۹۸۴)	
	$R_s/R_a = b_0 + b_1 * C + b_2 * C^2$	۱۸	بلک (۱۹۵۶)	

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (۴)$$

R_a تابش فرازمینی بر حسب مگا ژول بر مترمربع بر روز، G_{sc} ثابت خورشیدی برابر با ۰/۰۸۲ مگا ژول بر مترمربع بر دقیقه، d_r فاصله نسبی زمین تا خورشید، ω_s زاویه ساعتی خورشید بر حسب رادیان، φ عرض جغرافیایی بر حسب رادیان، و δ زاویه میل خورشید بر حسب رادیان، J شماره روز ژولیوسی است. جهت محاسبه حداکثر ساعات آفتابی ممکن (N) از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (۵)$$

فرایند واسنجی مدل‌های برآورد شدت تابش بر اساس

حداکثر طول ساعات آفتابی ممکن (N) و میزان تابش فرازمینی (R_a) در مقیاس روزانه نیز بر اساس یک سری روابط نظری به شرح زیر محاسبه شدند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (۱)$$

که

$$d_r = 1 + \left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (۲)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (۳)$$

هدف از انجام این کار، سنجش میزان حساسیت این مدل‌ها به مقادیر شدت تابش برآورد شده به‌عنوان ورودی این مدل‌ها بود.

تابش خالص با جمع جبری تابش‌های رسیده به سطح زمین به دو صورت طول موج کوتاه و طول موج بلند و تابش خروجی گسیل شده از سطح زمین به فضا با طول موج بلند مطابق با رابطه زیر به دست می‌آید (اسمعیلی و همکاران، ۱۳۹۶):

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - R_{l,o} + R_{l,i} \quad (6)$$

که R_s تابش رسیده به سطح زمین با طول موج کوتاه، $R_{l,o}$ تابش گسیل شده از سطح زمین با طول موج بلند، $R_{l,i}$ تابش رسیده با طول موج بلند از جو به سطح زمین و α آلبدوی سطح است. محاسبه $R_{l,o}$ با به کارگیری قانون استفان - بولتزمن و برآورد $R_{l,i}$ با بهره‌گیری از برخی روابط تجربی مثل رابطه کونزلمان و همکاران (۱۹۹۴) که مبتنی بر برخی متغیرها نظیر دمای هوا، فشار بخار و ابرناکی است قابل محاسبه است.

محاسبه تبخیر تعرق مرجع با به کارگیری روش فائو-پنمن - ماتیتث مطابق با رابطه زیر صورت گرفت که روشی استاندارد و مناسب تحت شرایط اقلیمی مختلف بوده و در تحقیقات متعددی از این روش استفاده شده است (حیدری تاشه کبود و خوشخو، ۱۳۹۸):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G_s) + \frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (7)$$

که در آن ET_0 تبخیر تعرق مرجع بر حسب mm/day ، R_n تابش خالص بر حسب $(Mj.m^{-2}.day^{-1})$ ، G_s چگالی شار گرمایی خاک بر حسب $Mj.m^{-2}.day^{-1}$ ، T میانگین دمای هوا بر حسب $^{\circ}C$ ، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر حسب m/s ، e_s و e_a به ترتیب فشار بخار واقعی و فشار بخار اشباع بر حسب kpa ، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع در مقابل دمای هوا بر حسب $kpa.C^{-1}$ و γ ثابت سایکرومتری بر حسب $kpa.C^{-1}$ است. همان‌گونه که از رابطه ۷ پیداست تابش خالص یکی

تمامی داده‌های موجود (کل دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۱) به انجام رسید و جهت اعتبارسنجی مدل‌ها، از روش اعتبارسنجی متقابل (cross validation) که در تحقیقات متعددی از جمله اسمعیلی و همکاران (۱۳۹۷) از آن استفاده شده است بهره گرفته شد. نقطه قوت اصلی این روش آن است که هم در واسنجی و هم در اعتبارسنجی مدل، تمامی داده‌های موجود نقش دارند. جهت اعتبارسنجی متقابل، کل دوره آماری ۲۵ ساله مذکور به ۵ دوره ۵ ساله تقسیم شد سپس در ۵ مرحله هر بار یکی از این دوره‌های ۵ ساله حذف شد و فرایند واسنجی ضرایب تجربی مدل بر اساس ۲۰ سال باقیمانده انجام شد و بر اساس ۵ سال حذف شده، مدل واسنجی شده بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شدت تابش مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. در هر کدام از این ۵ مرحله نیز جهت سنجش خطا از چهار شاخص درستی‌سنجی شامل میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، میانگین اریبی خطا (MBE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی نش - ساتکلیف (R_{eff}) استفاده شد (جدول ۲). پس از محاسبه چهار شاخص مذکور در هر ۵ مرحله، با میانگین‌گیری کردن از مقادیر هر کدام از این چهار شاخص طی ۵ مرحله مذکور، میزان خطای کلی مدل جهت برآورد شدت تابش مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۴. مدل‌سازی تابش خالص، تبخیر تعرق مرجع، ذوب

برف و دمای خاک

در این بخش از تحقیق، از مقادیر شدت تابش برآورد شده توسط بهترین مدل‌های برآورد شدت تابش شناسایی شده در مرحله قبل به‌عنوان متغیر ورودی مدل‌های شبیه‌سازی تابش خالص، تبخیر تعرق مرجع، ذوب برف، دمای خاک و رطوبت خاک (که در همه این فرایندها شدت تابش یکی از متغیرهای ورودی اصلی است) استفاده شد و مقادیر خروجی حاصل از این مدل‌های شبیه‌سازی، با خروجی همین مدل‌ها در حالتی که از داده‌های اندازه‌گیری شده شدت تابش جهت مدل‌سازی فرایندهای مذکور استفاده شود مورد مقایسه و سنجش قرار گرفت.

یک رابطه کلی شامل یک تابع برای لحاظ کردن اثر دمای هوا بر ذوب برف، یک تابع برای به حساب آوردن اثر تابش خورشید بر ذوب برف و یک تابع برای در نظر گرفتن اثر شار گرمای سطح خاک بر ذوب برف محاسبه می‌شود (گوستافسون و همکاران، ۲۰۰۰). لذا شدت تابش خورشید بر روی مدل‌سازی ذوب برف نیز اثر نمایانی دارد. بر این اساس، شدت تابش خورشید یکی از متغیرهای ورودی اصلی جهت شبیه‌سازی تمامی فرایندهای مذکور است. از مدل Coup در تحقیقات مختلفی جهت شبیه‌سازی فرایندهای مختلف از جمله دمای خاک و رطوبت خاک (نوروزولاشدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ قهرمان و همکاران، ۱۳۹۳)، عمق نفوذ یخبندان خاک (خوشخو و همکاران، ۱۳۹۲؛ خوشخو و همکاران، ۲۰۱۵)، عمق برف (گوستافسون و همکاران، ۲۰۰۰؛ خوشخو، ۱۳۹۵)، میزان تبخیر از سطح خاک و دمای سطح خاک (آلوناس و یانسن، ۱۹۹۸؛ خوشخو، ۱۳۹۷) استفاده شده است.

۲-۵. شاخص‌های مورد استفاده جهت درستی‌سنجی

مدل‌ها

شاخص‌هایی که در مراحل مختلف این تحقیق برای مقاصد گوناگون مورد استفاده قرار گرفتند شامل میانگین اریبی خطا (MBE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و شاخص کارایی نش- ساتنکلیف (R_{eff}) می‌باشند. فرمول محاسباتی هرکدام از این شاخص‌ها، حالت ایده‌آل آن‌ها و جنبه کاربردی هرکدام از این شاخص‌ها در جدول ۲ آورده شده است. از این شاخص‌ها هم جهت بهینه‌سازی مدل و هم جهت سنجش کارایی مدل‌های مختلف در تحقیقاتی مشابه استفاده شده است (خوشخو و همکاران، ۱۳۸۸، شفیع و همکاران، ۱۳۹۸).

از متغیرهای کلیدی در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع است. مطابق با رابطه ۶ نیز میزان تابش رسیده به سطح زمین با طول موج کوتاه نقش برجسته‌ای در محاسبه تابش خالص دارد. لذا برآورد دقیق هر دو متغیر تابش خالص و تبخیر و تعرق مرجع در گرو برآورد دقیق شدت تابش خورشید است که در این تحقیق توسط مدل‌های تجربی متعددی برآورد شده است.

جهت شبیه‌سازی دمای خاک و رطوبت خاک نیز از مدل Coup و جهت شبیه‌سازی برف از مدل برف تک لایه (SLSM) که در واقع یک زیر مدل از مدل Coup است استفاده شد. این مدل از زیرمدل‌های متعددی تشکیل شده است که این زیرمدل‌ها به صورت منسجم در قالب یک مدل واحد با هم جفت شده‌اند. دو معادله دیفرانسیلی جفت شده برای جریان‌های گرما و رطوبت در خاک، هسته اصلی این مدل را تشکیل می‌دهند که منشأ وقوع این جریان‌ها وجود گرادیان‌های دما و پتانسیل رطوبت در خاک می‌باشد. طبق قانون پایستاری انرژی، تابش خالص رسیده به سطح خاک را می‌توان معادل مجموع شارهای گرمای نهان، گرمای محسوس و گرما به داخل خاک در نظر گرفت که برآورد سهم هر یک از این شارها با روش تکرار که مبتنی بر تغییر مداوم دمای سطح خاک تا بسته شدن معادله ترازمندی انرژی سطح است، صورت می‌گیرد (آلوناس و یانسن، ۱۹۹۷). بر این اساس، مدل‌سازی ترازمندی انرژی در سطح خاک که در آن تابش خالص نقشی اساسی دارد ارتباط بسیار تنگاتنگی با شبیه‌سازی دمای خاک و رطوبت خاک دارد. حل معادلات مذکور نیز توسط مدل Coup مبتنی بر در نظر گرفتن یک نیم‌رخ تک‌بعدی و قائم خاک و تقسیم‌بندی آن به چندین لایه و اعمال معادلات حاکم برای هر لایه و حل آن‌ها به روش‌های عددی است. در خصوص مدل‌سازی ذوب برف نیز که با به‌کارگیری زیرمدل SLSM انجام شده است مقدار ذوب برف در طی هر شبانه‌روز با به‌کارگیری

جدول ۲. شاخص‌های به‌کارگرفته‌شده برای جداسازی شبیه‌سازی‌های کارآمد و ناکارآمد و حالت ایده‌آل آن‌ها.

کاربرد	حالت ایده‌آل	تعریف نمادها	فرمول محاسبه	شاخص
سنجش بیش یا کم برآورد کردن مدل	صفر	C_i : مقادیر محاسباتی O_i : مقادیر مشاهداتی n : تعداد کل داده‌های مشاهداتی \bar{O} : میانگین مقادیر مشاهداتی \bar{C} : میانگین مقادیر محاسباتی	$\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)}{n}$	MBE
سنجش میانگین قدرمطلق مقادیر خطا	یک		$\frac{\sum_{i=1}^n C_i - O_i }{n}$	MAE
بهینه‌سازی ضرایب تجربی مدل‌های تابش	یک		$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2}{n}}$	RMSE
سنجش درصد واریانس توجیه شده متغیر پاسخ توسط مدل	صفر		$\left(\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \right)^2$	R^2
جهت انتخاب مدل‌های برتر در مرحله واسنجی مدل‌های تابش	صفر		$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	R_{eff}

۳. نتایج و بحث

۳-۱. واسنجی مدل‌های تابش

نتایج حاصل از واسنجی مدل‌های تابش (بهینه‌سازی پارامترهای مدل) که با تکنیک سعی و خطا (تغییر پارامترهای هر کدام از این مدل‌ها به تعداد دفعات زیاد) و با معیار به حداقل رساندن شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین مقادیر برآوردشده و مشاهداتی R/R_a به انجام رسید در جدول ۳ منعکس شده است. بر این اساس، مقادیر بهینه‌سازی شده این پارامترها در واقع همان مقادیری هستند که با قرار دادن آن‌ها در مدل، کمترین مقدار RMSE بین سمت چپ و سمت راست هر کدام از این معادلات حاصل آمده است. پس از به‌کارگیری هر کدام از این مدل‌های واسنجی‌شده طی دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۹۷ و برآورد شدت تابش روزانه توسط آن‌ها، شاخص نش - ساتکلیف (ستون آخر جدول ۳) نیز طی دوره مذکور محاسبه شد. از این شاخص جهت مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف تابش و در نهایت شناسایی بهترین مدل‌ها استفاده شد. در خصوص دسته اول (مدل‌های مبتنی بر طول ساعات آفتابی)، دیده می‌شود که کارایی اکثر مدل‌ها خوب و مناسب و تا حدود زیادی نزدیک به هم (به‌استثنای مدل ۷) بوده و تغییرات شاخص نش - ساتکلیف بین این مدل‌ها چندان چشمگیر نیست. لذا

به جهت سهولت بیشتر، ساده‌ترین فرم (فرم خطی) به‌عنوان مدل برتر در این دسته از مدل‌ها در نظر گرفته شد که در واقع همان مدل آنگستروم - پرسکات است. در خصوص دسته دوم مدل‌ها (مدل‌های مبتنی بر دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا) نیز مدل‌های شماره ۱۵، ۱۶ و ۱۷ بر اساس شاخص نش - ساتکلیف عملکرد مطلوب‌تری داشته‌اند. با توجه به فرم غیرخطی هر سه مدل مذکور و عملکرد نسبتاً بهتر مدل‌های ۱۶ و ۱۷، در نهایت مدل شماره ۱۷ که به مدل بریستو - کمپل مشهور است و در مدل‌ها و تحقیقات متعددی به‌عنوان یک مدل مناسب جهت برآورد شدت تابش به‌ویژه در شرایط کمبود داده‌های هواشناسی نام برد شده است (یانسن و کارلبرگ، ۲۰۰۱) به‌عنوان مدل برتر در دسته دوم انتخاب شد. در خصوص دسته سوم مدل‌ها نیز که تنها یک فرم کلی غیرخطی (مشهور به مدل بلک) برای آن ارائه شده است در مرحله واسنجی، عملکرد این مدل بهتر از مدل‌های دسته دوم و پایین‌تر از مدل‌های دسته اول بود. به‌عنوان یک نتیجه کلی، مدل‌های مبتنی بر طول ساعات آفتابی، مدل مبتنی بر ابرناکی و مدل‌های مبتنی بر دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا به ترتیب بهترین مدل‌ها در مرحله واسنجی بودند. در شکل ۱ نمودار پراکنش بین مقادیر مشاهداتی و برآوردشده شدت تابش توسط سه مدل

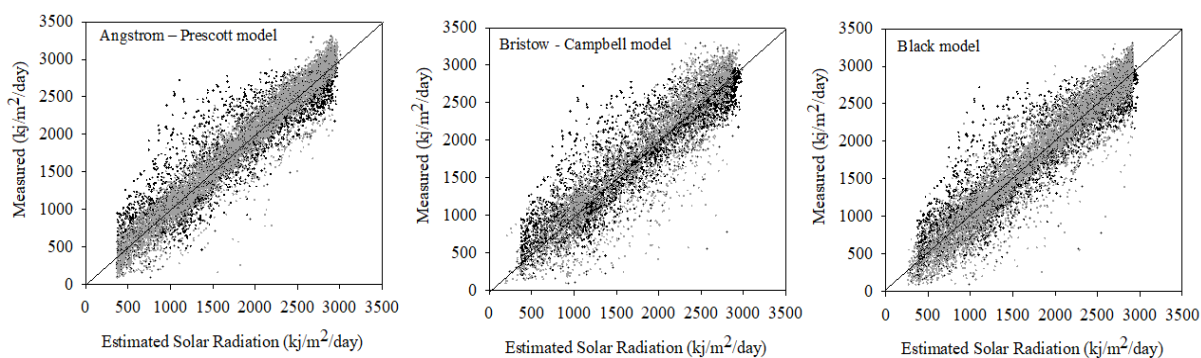
خطا را محاسبه می‌کند این شاخص می‌تواند توصیف‌کننده مناسبی از میزان خطاها به صورت کمی باشد. مقدار این شاخص برای سه مدل آنگستروم - پرسکات، بریستو - کمپل و بلک به ترتیب ۱۳۸/۵، ۲۲۷/۱۴ و ۲۵۱/۳ کیلوژول بر مترمربع بر روز به دست آمده است. به جهت ارائه یک درک مناسب‌تر و ملموس‌تر از درجه بزرگی خطاهای حاصل از به‌کارگیری سه مدل تابش با استفاده از شاخص MAE، از آنجایی که این شاخص از جنس خود داده‌های شدت تابش بوده و واحد اندازه‌گیری آن با واحد اندازه‌گیری داده‌های شدت تابش یکی است ابتدا میانگین مقادیر شدت تابش روزانه اندازه‌گیری شده در کل دوره آماری برای ایستگاه سنندج محاسبه شد (که برابر با ۱۸۱۲/۸ کیلوژول بر مترمربع بر روز به دست آمد) و مقادیر خطاهای فوق به صورت یک درصد نسبی از این مقدار میانگین بیان شدند. این درصد نسبی برای سه مدل آنگستروم - پرسکات، بریستو - کمپل و بلک به ترتیب ۷/۶، ۱۲/۵ و ۱۳/۹ درصد حاصل آمد که بیانگر آن است که خطاهای حاصله برای مدل آنگستروم - پرسکات کمتر از ۱۰ درصد میانگین کل داده‌ها و برای مدل‌های بریستو - کمپل و بلک کمتر از ۱۵ درصد میانگین کل داده‌ها بوده است. به لحاظ کم یا بیش برآورد کردن مدل‌ها بر اساس شاخص MBE دیده می‌شود که مقدار این شاخص برای مدل آنگستروم - پرسکات بسیار نزدیک به صفر (۳/۹-) و برای مدل بریستو - کمپل نیز تا حدودی نزدیک به صفر (۱۱/۹) و در حد قابل قبولی بوده است اما مقدار این شاخص برای مدل بلک عددی نسبتاً بزرگ و مثبت (۱۵۸/۹) بوده است که حاکی از تمایل این مدل به سمت بیش برآورد کردن شدت تابش است. برای هر سه مدل مقدار دو شاخص R^2 و R_{eff} نیز به ترتیب بزرگ‌تر از ۰/۸۳ و ۰/۷۸ به دست آمد که مقادیر قابل قبولی هستند. بالاترین مقادیر این دو شاخص برای مدل آنگستروم - پرسکات حاصل آمد که به ترتیب برابر با ۰/۹۴۵ و ۰/۹۴ بود.

واسنجی شده مذکور در دوره ۱۹۹۷-۲۰۲۱ همراه با خط نیمساز نشان داده شده است. این نمودار بیان‌کننده نزدیک‌تر بودن پراکنش نقاط حول خط نیمساز و در نتیجه عملکرد مناسب‌تر مدل آنگستروم - پرسکات در مقایسه با مدل‌های بریستو - کمپل و بلک می‌باشد. اگرچه برای هر سه مدل در مواردی فاصله نسبتاً زیاد بین نقاط از خط نیمساز قابل مشاهده است اما فراوانی چنین داده‌هایی در مقایسه با داده‌هایی که فاصله خیلی کمی نسبت به خط نیمساز دارند بسیار کمتر است.

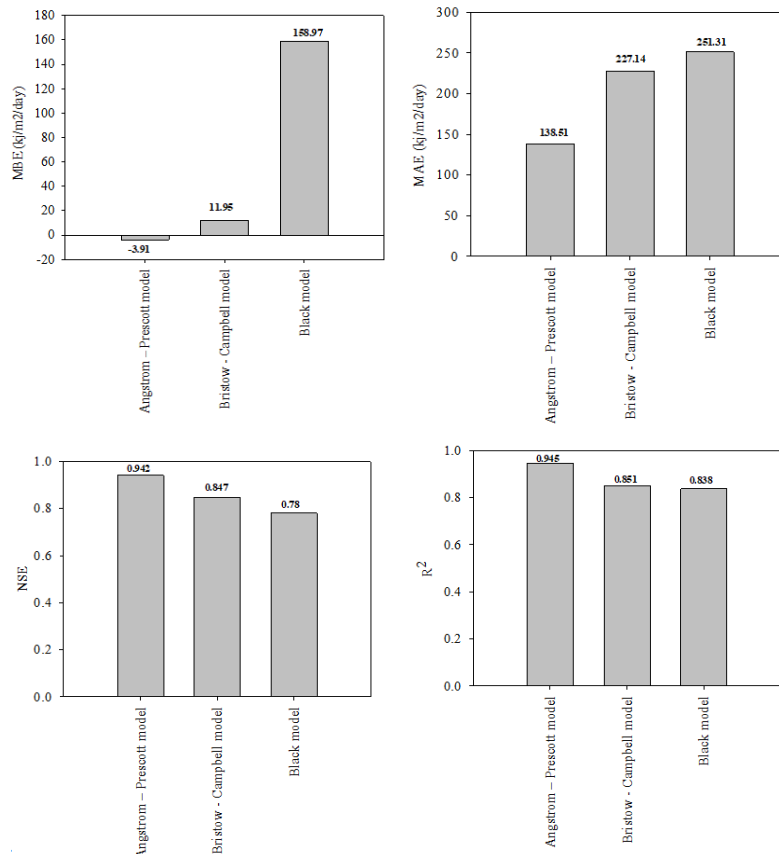
به جهت کمی‌سازی میزان دقت حاصل از به‌کارگیری مدل‌های تجربی برآورد شدت تابش، پس از تعیین و بهینه‌سازی ضرایب به کار گرفته شده در این مدل‌ها اعتبارسنجی مدل‌های منتخب نهایی (مدل آنگستروم - پرسکات، مدل بریستو - کمپل و مدل بلک) در برآورد شدت تابش خورشید به روش اعتبارسنجی متقابل انجام شد. این کار با تقسیم کل دوره آماری ۱۹۹۷-۲۰۲۱ به ۵ دوره (شامل دوره‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۱، ۲۰۰۶-۲۰۰۲، ۲۰۱۱-۲۰۰۷، ۲۰۱۶-۲۰۱۲، ۲۰۲۱-۲۰۱۷) و حذف هر کدام از این دوره‌ها در ۵ مرحله مجزا و محاسبه شاخص‌های درستی‌سنجی در هر مرحله و در نهایت میانگین‌گیری کردن از این شاخص‌ها طی این ۵ مرحله انجام شد که نتایج حاصله در شکل ۲ برای هر سه مدل برتر ارائه شده است. همان‌گونه که از این شکل پیداست در حالت کلی، تطابق مناسب و قابل قبولی بین مقادیر اندازه‌گیری شده شدت تابش و مقادیر برآورد شده آن با به‌کارگیری هر سه مدل وجود دارد. به لحاظ مقایسه بین این سه مدل دیده می‌شود که مدل آنگستروم بر اساس هر چهار شاخص درستی‌سنجی، عملکرد بهتری جهت برآورد شدت تابش از خود نشان داده است. برخلاف مرحله واسنجی که مدل بلک عملکرد بهتری از مدل بریستو - کمپل داشت در مرحله اعتبارسنجی دیده می‌شود که مدل بریستو - کمپل عملکرد نسبتاً مناسب‌تری داشته است. با توجه به اینکه شاخص MAE میانگین مقادیر قدرمطلق

جدول ۳. ضرایب واسنجی شده مدل‌های مختلف برآورد شدت تابش (مدل‌های برجسته شده در جدول مدل‌های منتخب از هر دسته هستند).

نوع مدل	شماره معادله	ضرایب واسنجی شده برای معادلات	R_{eff}
دسته اول (مدل‌های مبتنی بر طول ساعات آفتابی)	۱	$R/R_a = 0.232 + 0.526*n/N$	۰/۹۴۴
	۲	$R/R_a = 0.204 + 0.664*n/N - 0.123*(n/N)^2$	۰/۹۴۵
	۳	$R/R_a = 0.196 + 0.800*n/N - 0.480*(n/N)^2 + 0.242*(n/N)^3$	۰/۹۴۵
	۴	$R/R_a = 0.284*exp(1.023*n/N)$	۰/۹۳۸
	۵	$R/R_a = 0.001 + 0.289*exp(n/N)$	۰/۹۳۸
	۶	$R/R_a = 0.227 + 0.517*n/N + 0.006*exp(n/N)$	۰/۹۴۴
	۷	$R/R_a = 0.380 + 0.001/R_a + 8.596*(n/N)/R_a$	۰/۷۷۶
	۸	$R/R_a = 0.200 + 0.546*(n/N)^{0.827}$	۰/۹۴۵
	۹	$R/R_a = 0.230 + 0.002*exp(n/N) + 0.524*n/N$	۰/۹۴۴
	۱۰	$R/R_a = 0.976*sin(0.639*n/N + 0.224)$	۰/۹۴۵
دسته دوم (مدل‌های مبتنی بر دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا)	۱۱	$R/R_a = 0.283 + 0.227*\Delta T$	۰/۷۸۴
	۱۲	$R/R_a = 0.0207 + 0.711*\Delta T/N - 0.1932*(\Delta T/N)^2$	۰/۸۱۸
	۱۳	$R/R_a = -0.0222 + 0.8452*\Delta T/N - 0.3119*(\Delta T/N)^2 + 0.0314*(\Delta T/N)^3$	۰/۸۱۹
	۱۴	$R/R_a = 0.532 + 0.59*log(\Delta T/N)$	۰/۸۰۹
	۱۵	$R/R_a = 0.036 + 0.14*\Delta T^{0.5}$	۰/۸۲۲
	۱۶	$R/R_a = 0.702*(1-exp(-0.134*\Delta T^{0.5} - 0.060*\Delta T - 0.004*\Delta T^2))$	۰/۸۳۰
	۱۷	$R/R_a = 0.744*(1-exp(-0.107*\Delta T^{1.009}))$	۰/۸۳۰
دسته سوم (مدل مبتنی بر ابرناکی)	۱۸	$R/R_a = 0.701 - 0.152*C - 0.386*C^2$	۰/۹۰۷



شکل ۱. نمودار پراکنش بین مقادیر شدت تابش مشاهداتی و برآوردشده توسط سه مدل واسنجی شده برتر در دوره ۱۹۹۷-۲۰۲۱.



شکل ۲. اعتبارسنجی متقابل سه مدل برتر برآورد شدت تابش (مدل‌های آنگستروم-پرسکات، بریستو-کمپل و بلک) با به‌کارگیری چهار شاخص درستی‌سنجی MAE ، MBE ، R^2 و R_{eff}

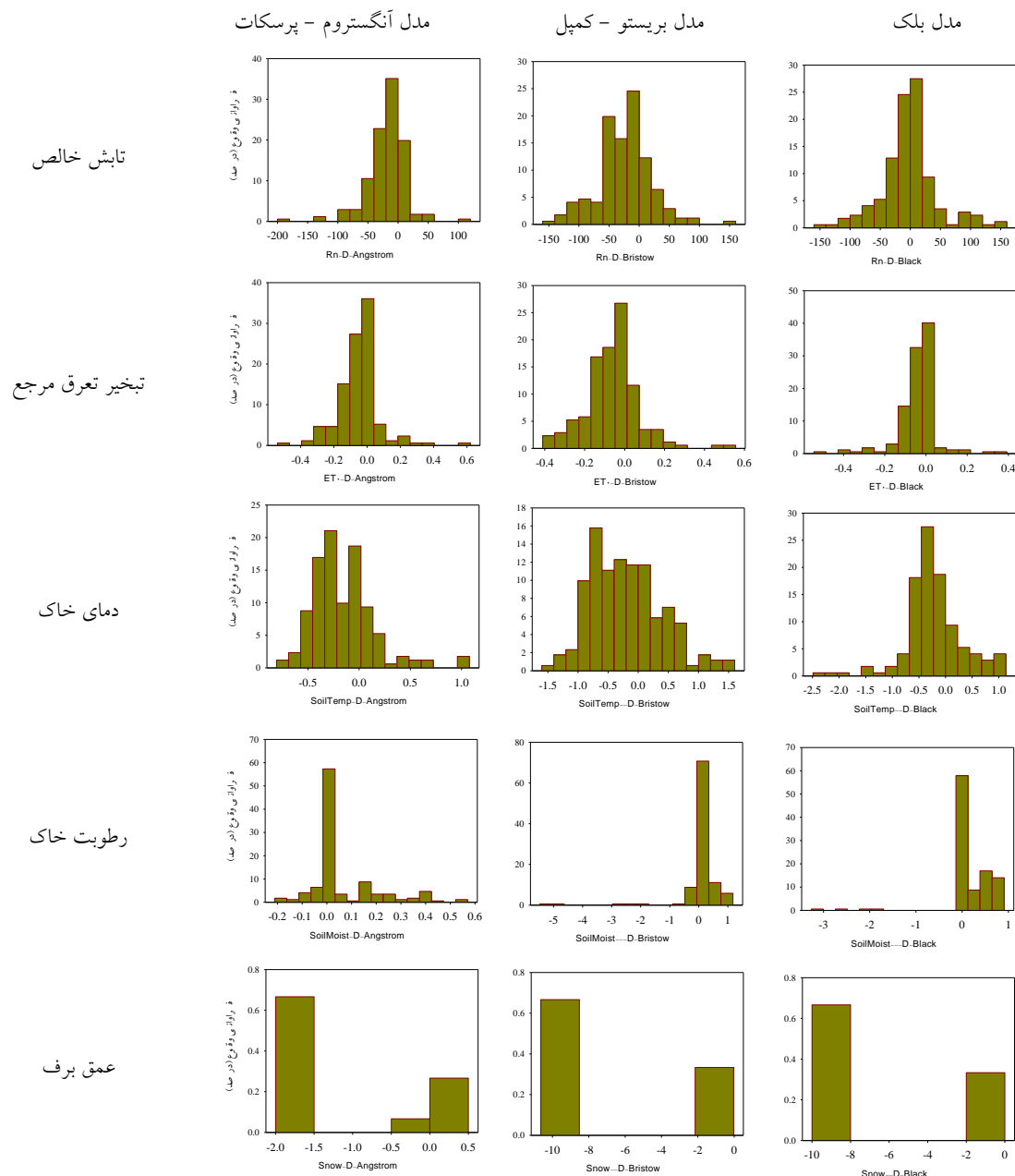
داده‌های برآوردشده شدت تابش توسط سه مدل منتخب تابش و استفاده از خود داده‌های مشاهداتی شدت تابش به‌عنوان متغیر ورودی) برای ۵ فرایند مذکور به تفکیک نشان داده شده است. نتایج حاصله در ارتباط با تابش خالص نشان‌دهنده آن است که بیشترین تمرکز خطا توسط هر سه مدل تابش، مابین مقادیر ۵۰- تا ۵۰+ کیلوژول بر مترمربع بر روز بوده است که مقدار قابل قبولی است و مدل آنگستروم در مقایسه با دو مدل دیگر منجر به حصول مقادیر کمتری از خطا شده است. در ارتباط با تبخیر تعرق مرجع، همان‌طور که مشاهده می‌شود با هر سه مدل تابش نتایج بسیار مناسب و با خطای پایینی به‌دست آمده است و بیشترین تمرکز خطا در دامنه ۰/۲- تا ۰/۱ میلی‌متر بر روز بوده است. در ارتباط با دمای خاک در عمق ۱۰ سانتی‌متری نیز مدل آنگستروم (با بیشترین تمرکز خطا در دامنه ۰/۵- تا ۰/۲ درجه سانتی‌گراد) عملکرد مناسب‌تری

۲-۳. به‌کارگیری مقادیر شدت تابش برآوردشده به‌عنوان ورودی چند مدل

در این بخش از تحقیق چند فرایند مختلف شامل تابش خالص، تبخیر تعرق مرجع، دمای خاک، رطوبت خاک و ذوب برف که جهت مدل‌سازی آن‌ها شدت تابش نقش مهمی دارد انتخاب شدند و این مدل‌ها در دو مرحله (یک‌بار بر اساس داده‌های ورودی شدت تابش واقعی و یک‌بار داده‌های ورودی شدت تابش برآوردشده توسط سه مدل منتخب) اجرا شدند و خروجی‌های هرکدام از فرایندهای فوق در این دو مرحله با هم مقایسه شد تا ارزیابی شود به‌هنگام شبیه‌سازی این فرایندها، در اثر به‌کارگیری شدت تابش برآوردشده به‌عنوان ورودی این مدل‌ها چه میزان خطا حادث خواهد داد. در شکل ۳، هیستوگرام مقادیر خطا (تفاضل بین خروجی‌های حاصل از هرکدام از فرایندهای فوق در دو حالت استفاده از

بوده است؛ اما در موارد محدودی این خطا برای این دو مدل به ترتیب به ۳ و ۵ درصد رسیده است. در خصوص مدل سازی برف نیز که فقط بر پایه چند روز برفی و محدود انجام شد مدل آنگستروم با تمرکز خطای بین ۲- تا ۵/۰ سانتی متر مدلی بسیار مناسب و مدل های بلک و بریستو عملکردی مشابه و نه چندان مناسب (تمرکز مقادیر خطا بین ۰ تا ۱۰- سانتی متر) داشتند.

از دو مدل بلک و بریستو-کمپل (با بیشترین تمرکز خطا در دامنه ۱- تا ۱ درجه سانتی گراد) داشته است. برای مدل سازی رطوبت خاک بر حسب درصد رطوبت حجمی، مدل آنگستروم کارایی بسیار مناسبی داشته است و کلیه مقادیر خطا حدود صفر درصد بوده اند و مدل های بلک و بریستو-کمپل نیز عملکردی مناسب و نسبتاً مشابه داشته اند و اکثریت مقادیر خطای آن ها کمتر از ۱ درصد



شکل ۳. هیستوگرام مقادیر تفاضل بین خروجی های حاصل از هر کدام از فرایندهای تابش خالص، تبخیر تعرق مرجع، دمای خاک، رطوبت خاک و عمق برف در دو حالت استفاده از داده های برآورد شده شدت تابش توسط سه مدل منتخب و استفاده از خود داده های مشاهداتی شدت تابش به عنوان متغیر ورودی.

۴. نتیجه‌گیری

متغیرهای هواشناسی متنوعی به‌عنوان متغیرهای ورودی استفاده می‌کنند لذا در صورتی که هر کدام از متغیرهای هواشناسی مورد نیاز این سه مدل (دمای هوا یا ابرناکی یا طول ساعات آفتابی) در یک ایستگاه به‌صورت اندازه‌گیری شده در دسترس باشد این امکان وجود دارد که شدت تابش را با دقت مناسب برآورد کرد. به‌ویژه آنکه به‌عنوان مثال در بسیاری از ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی (کلیما‌تولوژی) وابسته به سازمان هواشناسی کشور و همچنین ایستگاه‌های تبخیرسنجی وابسته به وزارت نیرو، طول ساعات آفتابی اندازه‌گیری نمی‌شود اما دامنه تغییرات شبانه‌روزی دمای هوا و در برخی موارد ابرناکی در این ایستگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود که در چنین مواردی می‌توان از مدل‌های بریستو-کمپل و بلک جهت برآورد شدت تابش استفاده کرد و بدین ترتیب به مقدار برآورد شده شدت تابش در یک شبکه ایستگاه‌های مترکم‌تری دست یافت و به تبع آن، از این مقادیر برآورد شده شدت تابش به‌عنوان ورودی مدل‌های دیگر (مثل مدل‌های شبیه‌سازی دما و رطوبت خاک، ذوب برف، تبخیر تعرق و ...) بهره گرفت. نتایج حاصل از به‌کارگیری مقادیر شدت تابش برآورد شده توسط این سه مدل به‌عنوان ورودی فرایندهای مختلف و مقایسه آن با حالتی که از مقادیر اندازه‌گیری شده شدت تابش به‌عنوان ورودی این مدل‌ها استفاده شده بود نیز نشان داد که به‌کارگیری مدل آنگستروم و استفاده از شدت تابش برآورد شده توسط آن به‌عنوان متغیر ورودی تمامی فرایندها (تابش خالص، تبخیر تعرق مرجع، ذوب برف و دما و رطوبت خاک) منجر به حصول نتایجی قابل قبول و مناسب خواهد شد به‌گونه‌ای که در کلیه فرایندهای مذکور، مدل آنگستروم بهترین عملکرد را به خود اختصاص داد. در ارتباط با دو مدل بریستو-کمپل و بلک که عملکردی کم‌ویش مشابه از خود نشان دادند به‌هنگام به‌کارگیری شدت تابش برآورد شده توسط آن‌ها به‌عنوان متغیر ورودی ۵ فرایند مورد مطالعه در این تحقیق، بهترین عملکرد این دو مدل به ترتیب برای شبیه‌سازی

نتایج کلی این تحقیق تطابق مناسب و قابل قبولی بین مقادیر اندازه‌گیری شده شدت تابش و مقادیر برآورد شده آن با به‌کارگیری هر سه مدل آنگستروم - پرسکات، بریستو - کمپل و بلک را نشان داد که این عملکرد برای مدل آنگستروم - پرسکات مناسب‌تر از دو مدل دیگر بود به‌گونه‌ای که با انجام اعتبارسنجی متقابل، شاخص میانگین قدر مطلق خطا برای مدل آنگستروم - پرسکات برابر با ۱۳۸/۵ کیلوژول بر مترمربع بر روز و برای دو مدل بریستو-کمپل و بلک به ترتیب برابر با ۲۲۷/۱۴ و ۲۵۱/۳ کیلوژول بر مترمربع بر روز به دست آمد. با مقایسه نتایج حاصله از این تحقیق با تحقیقات پیشین، به‌عنوان نمونه قهرمان و بختیاری (۲۰۰۹) برای ایستگاه همدان که در نزدیکی ایستگاه مورد مطالعه در این تحقیق قرار دارد از بین مدل‌های مختلف برآورد شدت تابش مبتنی بر دمای هوا و بارش، مدل بریستو - کمپل را مدلی مناسب‌تر برای این ایستگاه پیشنهاد کرده‌اند که این نتایج در کنار نتایج تحقیق فعلی حکایت از کارایی مطلوب این مدل در غرب ایران دارد و پیشنهاد می‌شود که با توجه به نیاز صرف این مدل به مقادیر حداقل و حداکثر شبانه‌روزی دمای هوا، کارایی این مدل در اقلیم‌های متنوع ایران مورد بررسی قرار گیرد. جانباز قبادی (۱۳۹۶) نیز ضمن به‌کارگیری چند مدل تجربی برآورد شدت تابش، برای اقلیم‌های مرطوب نواحی شمالی کشور مدل آنگستروم - پرسکات را به‌عنوان مدل مناسبی معرفی کرده است که با کنار هم قرار دادن نتیجه تحقیق ایشان با نتایج حاصل از تحقیق فعلی، کارایی مناسب این مدل را در اقلیم‌های متنوع ایران می‌توان نتیجه گرفت.

در یک بیان کلی، با توجه به عملکرد نسبتاً مطلوب هر سه مدل مورد بررسی در این تحقیق چنین نتیجه‌گیری می‌شود که تحت دامنه‌ای از حالت‌ها به لحاظ موجودیت داده‌های هواشناسی، امکان برآورد شدت تابش با دقت مناسب وجود دارد. به بیانی دیگر از آنجایی که این مدل‌ها از

آن از داده های ایستگاه‌های هواشناسی استان مازندران. فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای، (۱)۸، ۲۳۷-۲۴۹.

حیدری تاشه کبود، ش. و خوشخو، ی. (۱۳۹۸). تصویرسازی و پیش‌بینی تغییرات آبی تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس‌های فصلی و سالانه در غرب ایران بر اساس سناریوهای انتشار RCP. مجله تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۵۳، ۱۵۷-۱۷۶.

خلیلی، ع. و رضایی صدر، ح. (۱۳۷۶). برآورد تابش کلی خورشید در گستره ایران بر مبنای داده‌های اقلیمی. مجله تحقیقات جغرافیایی، ۴۶، ۱۵-۳۵.

خوشخو، ی.، خلیلی، ع.، رحیمی، ح. و ایران نژاد، پ. (۱۳۸۸). شبیه‌سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی ضریب پخشیدگی گرمایی خاک یخ‌زده در شرایط رطوبتی مختلف. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۱)، ۸۹-۹۹.

خوشخو، ی.، ایران نژاد، پ.، خلیلی، ع.، رحیمی، ح. و لیاقت، ع. (۱۳۹۲). ارزیابی مدل COUP برای شبیه‌سازی عمق نفوذ یخبندان خاک در ایستگاه سینوپتیک بیجار. مجله هواشناسی کشاورزی، ۱، ۱۱-۲۰.

خوشخو، ی. (۱۳۹۵). واسنجی و اعتبارسنجی مدل برف تک لایه (SLSM) برای شبیه‌سازی عمق برف در ایستگاه سینوپتیک سقز. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۷(۳)، ۵۱۷-۵۲۷.

خوشخو، ی. (۱۳۹۷). ارزیابی دو روش بیلان انرژی در سطح خاک و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای جهت برآورد میانگین شبانه‌روزی دمای سطح خاک. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۵(۳)، ۱۷۷-۱۹۲.

رودری، آ. و زندپارسا، ش. (۱۳۹۳). برآورد تابش خورشیدی ساعتی رسیده به گیاه گندم. هواشناسی کشاورزی، ۱(۲)، ۱-۱۰.

سبزی پرور، ع.ا.، تفضلی، ف.، زارع ایبانه، ح.، بانژاد، ح.،

تبخیر تعرق مرجع، تابش خالص، دما و رطوبت خاک و ذوب برف به دست آمد.

منابع

ابراهیمی، ح.، آقاشریعتمداری، ز.، حجایی، س. و قمشلو، ن. (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) در برآورد تابش کل خورشیدی. هواشناسی کشاورزی، ۱(۱)۸، ۳-۱۴.

احمدی باصری، ن.، سبزی پرور، ع.ا.، خدامرادپور، م.، گرو راسکادو، خ.ل. و آلدوس آربولداس، ل. (۱۳۹۹الف). ارزیابی محصولات مختلف ماهواره‌ای تابش سطح زمین با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی زمینی در اقلیم‌های مختلف ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۲(۳)، ۴۲۹-۴۴۳.

احمدی باصری، ن.، سبزی پرور، ع.ا.، خدامرادپور، م.، گرو راسکادو، خ.ل. و آلدوس آربولداس، ل. (۱۳۹۹ب). ارزیابی کارایی سامانه GLDAS در برآورد تابش سطح روزانه در ایران. آب و خاک، ۳۴(۲)، ۵۰۱-۵۱۳.

اسمعیلی، س.، خوشخو، ی.، بابایی، خ. و اسعدی اسکوتی، ا. (۱۳۹۶). برآورد تبخیر و تعرق واقعی محصول برنج با به‌کارگیری الگوریتم METRIC در بخشی از شمال ایران. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۴(۶)، ۱۰۵-۱۲۲.

اسمعیلی، س.، خوشخو، ی. و عبداللهی، م. (۱۳۹۷). برآورد پارامترهای روزانه و ماهانه دمای هوا در استان کردستان با به‌کارگیری تصاویر سنجنده MODIS. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۹(۲)، ۴۱۳-۴۲۳.

آقاشریعتمداری، ز.، خلیلی، ع.، ایران نژاد، پ. و لیاقت، ع. (۱۳۹۰). واسنجی و تغییرات سالانه ضرایب رابطه آنگستروم-پرسکات. نشریه آب و خاک، ۲۵(۴)، ۹۰۵-۹۱۱.

جانباز قبادی، غ. (۱۳۹۶). واسنجی و اعتبارسنجی مدل برآورد میزان تابش خورشید جهانی و پهنه‌بندی میزان

عطایی، ف.، ایران نژاد، پ.، مزرعه‌ئی فراهانی، م. و علیزاده، ا. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی توزیع ذرات گردو خاک در مقیاس جهانی و تاثیرشان بر شارش‌های تابشی با استفاده از مدل WRF/Chem. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۲(۳)، ۶۱۹-۶۳۲.

قهرمان، ن.، ایران نژاد، پ. و نوروز ولاشدی، ر. (۱۳۹۳). مقایسه عملکرد دو مدل شبیه‌سازی فیزیکی و رگرسیونی برای برآورد دمای خاک زیر پوشش چمن در اقلیم کرج. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۵، ۲۴۳-۲۵۳.

مشایخی، ر.، ایران نژاد، پ. و علی اکبری بیدختی، ع. (۱۳۸۹). شبیه‌سازی هواویزها و واداشت تابشی ناشی از آن‌ها با استفاده از مدل جفت شده هواویز HAM و مدل میان مقیاس پیش‌بینی وضع هوا WRF. *فیزیک زمین و فضا*، ۳۶(۲)، ۹۱-۱۰۷.

نوروز ولاشدی، ر.، قهرمان، ن. و ایران نژاد، پ. (۱۳۹۱). ارزیابی مدل شبیه‌سازی COUP جهت برآورد رطوبت و دمای خاک با پوشش گیاهی ذرت و خاک بدون پوشش. *پژوهش‌های خاک*، ۲۶(۱)، ۵۵-۶۶.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper*, 56, FAO, Rome. 300p.

Almorox, J., & Hontoria, C. (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 45, 1529-1535.

Alvenas, G., & Jansson, P.E. (1997). Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: Calibration and sensitivity analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88, 47-56.

Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50, 121-126.

Bahel, V., Bakhsh, H., & Srinivasan, R. (1987). A correlation for estimation of global solar radiation. *Energy*, 12, 131-135.

Bakirci, K. (2009). Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy*, 34, 485-501.

Besharat, F., Dehghan, A., & Faghieh, A.R.

موسوی بایگی، م.، غفوری، م.، محسنی موحد، ا. و مریانجی، ز. (۱۳۸۷). مقایسه چند مدل برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه خشک به منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش. *آب و خاک*، ۲۲(۲)، ۳۲۷-۳۴۰.

سبزی پرور، ع.ا.، عاقل پور، پ. و ورشویان، و. (۱۳۹۸). مقایسه عملکرد رگرسیون خطی چندمتغیره و مدل‌های هوش مصنوعی در تخمین تابش کل خورشیدی. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۱(۲)، ۳۵۳-۳۷۲.

شفیعی، م.، بذرافشان، ج. و ایران نژاد، پ. (۱۳۹۸). مقایسه چهار روش تحلیل حساسیت پارامترهای مدل مفهومی HBV برای حوضه آبریز کرخه و زیرحوضه های آن. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۵(۱)، ۸۹-۱۰۵.

صداقت مصعبی، ب.، آقا شریعتمداری، ز.، قربانی، خ. و حجابی، س. (۱۳۹۸). ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد تابش خورشید در سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۸)، ۱۹۶۳-۱۹۷۳.

(2013). Empirical models for estimating global solar radiation: a review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 798-821.

Black, J.N. (1956). The distribution of solar radiation over the earth's surface, *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, 7, 89-156.

Bristow, K.L., & Campbell, G.S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31, 66-159.

Chukwujindu, N.S. (2017). A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa. *Renewable and sustainable energy reviews*, 78, 955-995.

Elagib, N., & Mansell, M.G. (2000). New approaches for estimating global solar radiation across Sudan. *Energy Conversion and Management*, 41, 419-434.

Gahreman, N., & Bakhtiari, B. (2009). Solar radiation estimation from rainfall and temperature data in arid and semi-arid climates of Iran. *Desert*, 14(2), 141-150.

- Garcia, J.V. (1994). *Physical principles of climatology*, National Agrarian University Press, Lima, Peru, 650 p.
- Gustafsson, D., Stahli, M., & Jansson, P.E. (2000). The surface energy balance of a snow cover: comparing measurements to two different simulation models. *Theoretical and Applied Climatology*, 70, 81-96.
- Hargreaves, G.L., & Riley, J.P. (1985). Irrigation water requirements for Senegal river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111, 265-275.
- Hunt, L.A., Kuchar, L., & Swanton, C.J. (1998). Estimation of solar radiation for use in crop modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(3-4), 293-300.
- Jansson, P.E., & Karlberg, L. (2001). Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Dept. of Land and Water Resource Engineering, Royal Inst. of Technology, Stockholm, 321 p.
- Khoshkhoo, Y., Jansson, P.E., Irannejad, P., Khalili, A., & Rahimi, H. (2015). Calibration of an energy balance model to simulate wintertime soil temperature, soil frost depth, and snow depth for a 14-year period in a highland area of Iran, *Cold Regions Science and Technology*, 119, 47-60.
- Konzelmann, T., Van de Wal, R.S.W., Greuell, W., Bintanja, R., Henneken, E.A.C., & Abe-Ouchi, A. (1994). Parameterization of global ad long wave incoming radiation for the Greenland Ice Sheet. *Global and Planetary Change*, 9, 143-164.
- Li, M.F., Tang, X.P., Wu, W., & Liu, H.B. (2013). General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. *Energy conversion and management*, 70, 139-148.
- Ogelman, H., Ecevit, A., & Tasemiroglu, E. (1984). A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. *Solar Energy*, 33, 619-625.
- Prieto, J.I., & García, D. (2021). Global solar radiation models: A critical review from the point of view of homogeneity and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 1-21.
- Prescott, J.A. (1940). Evaporation from water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 64, 114-118.
- Teke, A., & Yildirim, H.B. (2014). Estimating the monthly global solar radiation for Eastern Mediterranean Region. *Energy Conversion and Management*, 87, 628-35.
- Togrul, I.T., & Onat, E. (1999). A study for estimating solar radiation in Elazig using geographical and meteorological data. *Energy Conversion and Management*, 40(14), 1577-1584.
- Urraca, R., Martinez-de-Pison, E., Sanz-Garcia, A., Antonanzas, J., & Antonanzas-Torres, F. (2017). Estimation methods for global solar radiation: Case study evaluation of five different approaches in central Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 1098-1113.