

واسنجی و ارزیابی مدل‌های مختلف تجربی تخمین تابش خورشیدی روزانه در ایستگاه سینوپتیک یزد

سمیه سلطانی گردفرامری^{۱*}

چکیده

تابش خورشیدی به‌عنوان یکی از متغیرهای مهم در مدل‌های بیلان انرژی، تبخیر-تعرق و شبیه‌سازی رشد گیاهان است. در این تحقیق عملکرد ۴۱ مدل تجربی (۷ و ۲۴ مدل به ترتیب بر اساس داده‌های تابش خورشیدی، دما و سایر داده‌های هواشناسی) در برآورد تابش خورشیدی روزانه در ایستگاه سینوپتیک یزد در حد فاصل سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفت و ضرائب ثابت معادلات با استفاده از تحلیل رگرسیون و در نرم افزار SPSS محاسبه گردید. از آمار سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۰ برای واسنجی و از آمار سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد و معیارهای ارزیابی پرکاربرد مانند ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، قدر مطلق میانگین خطا (MAE) و ضریب تبیین (R^2) به کار رفت. نتایج نشان داد که مدل‌های تجربی که بر اساس داده‌های هواشناسی دمای میانگین، تابش فرازمینی، ساعات آفتابی و حداکثر ساعات آفتابی، تابش خورشیدی را تخمین می‌زند، نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها نشان می‌دهند؛ به‌طوری که مدل شماره ۳۴ (مدل Togrul and Onat, 1999) با ضریب تبیین برابر با ۰/۷۵، میانگین مربعات خطای ۱/۸۹۲ و قدر مطلق میانگین خطای برابر با ۱/۲۶۳ بهترین نتیجه را نسبت به سایر مدل‌های تجربی کسب کرد و مدل‌هایی که تابش خورشیدی را بر اساس تنها پارامتر دما پیش‌بینی می‌کنند، نسبت به سایر مدل‌ها نتیجه ارزیابی پایین‌تری نشان دادند. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های ترکیبی (چندمتغیره) از دیدگاه هواشناسی، هیدرولوژی و فیزیک جو عملکرد بهتری در برآورد تابش خورشیدی دارند، زیرا تابش خورشیدی در سطح زمین حاصل برهم‌کنش هم‌زمان چندین فرآیند جوی است و یک متغیر به‌تنهایی نمی‌تواند تمام این فرآیندها را توصیف کند. از سوی دیگر هرچند روش‌های ترکیبی و یادگیری ماشین اغلب از نظر دقت از مدل‌های تجربی بهتر عمل می‌کنند، اما فرمول‌های تجربی همچنان به دلیل سادگی خود، در بسیاری از موارد به عملکرد رضایت‌بخش دست می‌یابند.

واژگان کلیدی:

برآورد تابش خورشیدی، روش‌های رگرسیونی، پارامترهای هواشناسی موثر، کارایی مدل‌های پیش‌بینی.

مقاله پژوهشی

۱. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

ssoltani@ardakan.ac.ir

* نویسنده مسئول

شناسه مقاله: ۲۶۰۴-۱۱۵۹
شماره صفحه پایایی: ۱۳۵۲-۱۳۶۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۴
انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱
زمان پذیرش: ۱۰۰ روز

استناددهی:

سلطانی گرد فرامری، س. (۱۴۰۵). واسنجی و ارزیابی مدل‌های مختلف تجربی تخمین تابش خورشیدی روزانه در ایستگاه سینوپتیک یزد. مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، (۲) ۳۶-۲۶.

۱- مقدمه

تابش خورشیدی یکی از متغیرهای مهم و موثر هواشناسی در برآورد تبخیر و تعرق و نیاز آبی گیاهان است و منشا انرژی برای همه تحولات جو و سطح زمین می‌باشد. اندازه‌گیری تابش خورشیدی در ایران سابقه نسبتاً طولانی دارد، با این حال به دلیل هزینه‌های بالای تجهیزات اندازه‌گیری، در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی کشور دستگاه‌های تابش سنج (پیرانومتر) نصب نشده است. علاوه بر این، در ایستگاه‌های مجهز نیز عواملی مانند نیاز به واستنجی دوره‌ای، تجمع گرد و غبار و آب بر سطح سنسور و همچنین خرابی‌های احتمالی تجهیزات، می‌تواند منجر به کاهش دقت یا ایجاد خلأ در داده‌های ثبت شده شود (سلطانی گردفرامرز، ۱۴۰۲). از سوی دیگر، با وجود اهمیت بالای داده‌های دقیق تابش خورشیدی در کاربردهایی مانند مدیریت آبیاری و مطالعات هیدرولوژیکی، محدودیت‌های ذکر شده باعث شده است که در بسیاری از مناطق دنیا داده‌های اندازه‌گیری مستقیم تابش خورشیدی در دسترس نباشد یا دارای کیفیت نامناسب باشد (Ali et al., 2025; Yadav et al., 2025; Attaya et al., 2025). حتی در ایستگاه‌های هواشناسی هم که تابش را اندازه می‌گیرند، روزهایی وجود دارد که داده‌های تابش ثبت نمی‌شود یا مقادیر غیرواقعی و خارج از بازه مورد انتظار به دلیل نقص دستگاه و یا مشکلات دیگر مشاهده می‌شود (سلطانی گردفرامرز و عسکری زاده، ۱۴۰۳). هرچند در اغلب این ایستگاه‌ها ساعات آفتابی و سایر پارامترهای هواشناسی به‌طور روزانه اندازه گرفته می‌شود. در چنین شرایطی، مدل‌های تجربی با استفاده از ورودی‌های هواشناسی به آسانی در دسترس، یک جایگزین عملی ارائه می‌دهند. این مدل‌های نوع رگرسیونی، تابش خورشیدی روزانه یا ماهانه را از متغیرهایی مانند ساعات آفتابی یا دما تخمین می‌زنند و به‌طور گسترده در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند، زیرا فقط به داده‌های هواشناسی رایج نیاز دارند و ساده و کم‌هزینه هستند (آقاشریعتمداری و همکاران، ۱۳۹۰). از طرف دیگر، برآورد تابش خورشیدی در مناطق گرم و خشک، با وجود اهمیت فراوان، به دلیل کمبود داده‌های اندازه‌گیری شده، چالش برانگیز است. مدل‌های تجربی، به‌ویژه فرمول‌های مبتنی بر تابش آفتاب مانند آنگستروم-پرسکات و فرمول‌های مبتنی بر دما مانند هارگریوز-سامانی به دلیل سادگی و نیاز کم به داده، همچنان پرکاربردترین روش‌ها در این مناطق هستند (Naserpour et al., 2020). مطالعات متعددی این مدل‌ها را برای آب و هوای خشک کالیبره کرده و دقت قابل قبول آن‌ها را نشان داده‌اند. مزیت اصلی مدل‌های تجربی این است که از داده‌های هواشناسی در دسترس برای پر کردن شکاف در نبود داده‌های پیرانومترها استفاده می‌کنند. با این حال، دقت آن‌ها وابسته به شرایط است و ضرایب مدل باید برای آب و هوای خشک و بیابانی تطبیق داده شوند (فولادمند و کریمی، ۱۳۹۶). به همین منظور مطالعاتی در مناطق مختلف دنیا و ایران انجام شده است. Tabari et al. (۲۰۱۶) دوازده مدل تجربی تابش را در مناطق نیمه‌خشک و خشک ایران ارزیابی کردند. آنها دریافتند که کالیبره کردن ضرایب مدل‌های تابش خورشیدی، تبخیر و تعرق مرجع روزانه را با کاهش خطا به میزان ۲/۸ درصد در مناطق نیمه‌خشک و ۶/۴ درصد در مناطق خشک بهبود می‌بخشد که نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل است. به‌طور مشابه، Banihashemi Dehkordi et al. (۲۰۲۲) دریافتند که پس از واستنجی با الگوریتم‌های پیشرفته، مدل استاندارد آنگستروم-پرسکات بهترین عملکرد را در بین تمام مدل‌های آزمایش شده در مناطق خشک ایران داشته است. در یک بررسی گسترده در ایران، Naserpour et al. (۲۰۲۰) نشان دادند که فرمول‌های مبتنی بر تابش خورشید به تنهایی در همه جا بهترین عملکرد را ندارد و در مناطق با شرایط آب و هوای مختلف نتایج متفاوت است. این نتیجه نشان می‌دهد که ضرایب تجربی به‌صورت منطقه‌ای متفاوت هستند و بنابراین مدل‌ها باید با شرایط جغرافیایی منطقه تطبیق داده شوند. فراتر از ایران، مطالعات در سایر مناطق خشک و بیابانی نیز از این نتایج پشتیبانی می‌کنند. به‌عنوان مثال، Marzo et al. (۲۰۱۷) مدل‌های ترکیبی مبتنی بر دما را در آب و هوای نیمه‌خشک الجزایر توسعه دادند و نشان دادند که دقت آن‌ها نسبت به هارگریوز-سامانی استاندارد بهبود یافته است. به‌طور کلی، آسمان صاف و نوسانات دمایی روزانه زیاد در مناطق خشک، تفاوت دمای حداقل و حداکثر را در این مناطق مشخص‌تر می‌کند. Mohammadi and Moazenazadeh (۲۰۲۱) گزارش می‌دهند که در منطقه مورد مطالعه خود در پرو، مدل‌های هارگریوز-سامانی و چن مقدار خطا را به ترتیب حدود ۰/۷۱ و ۰/۸۵ مگاژول بر متر مربع در روز نشان دادند. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که ایستگاه‌های آفتابی و خشک می‌توانند به خوبی توسط فرمول‌های ساده مبتنی بر تابش آفتاب یا دما، در صورت کالیبره‌شدن دقیق، پوشش داده شوند. مدل‌های تجربی به‌طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: مدل‌های مبتنی بر تابش خورشیدی مانند فرمول آنگستروم-پرسکات، مدل‌های مبتنی بر دما مانند هارگریوز-سامانی و مدل‌های ترکیبی که بر اساس ترکیب پارامترهای هواشناسی به‌دست می‌آیند (زند سلیمی و همکاران، ۱۴۰۳). مدل آنگستروم-پرسکات نسبت تابش اندازه‌گیری شده به تابش فرازمینی را به کسر ساعات تابش خورشید ممکن (n/N) از طریق ضرایب a و b مرتبط می‌کند. این مدل به‌طور گسترده برای تخمین تابش خورشیدی در مناطقی که داده‌های اندازه‌گیری شده ندارند یا داده‌هایشان ناقص است، پیشنهاد می‌شود. ضرایب a و b معمولاً با رگرسیون خطی یا بهینه‌سازی تعیین می‌شوند و بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که ضرایب کالیبره‌شده محلی، دقت را در آب و هوای خشک و نیمه خشک بهبود می‌بخشند. به‌عنوان مثال، Banihashemi Dehkordi et al. (۲۰۲۲) مدل آنگستروم-پرسکات را در شش ایستگاه در سراسر مناطق خشک/نیمه‌خشک ایران کالیبره کردند و دریافتند که مدل کالیبره شده خطاهای کمتری نسبت به نسخه‌های اصلاح‌شده پیچیده‌تر دارد. در اصل، یک مدل ساده‌ی آنگستروم-پرسکات با پارامترهای کالیبره شده، اغلب از سایر مدل‌های تخمین تابش خورشیدی در صورت بهینه‌سازی مناسب، عملکرد بهتری دارد. به‌طور مشابه، Raziei and Pereira (۲۰۱۳) نشان دادند که با ضرایب کالیبره شده مناسب، روش هارگریوز-سامانی می‌تواند تبخیر و تعرق مرجع را در تمام اقلیم‌های ایران پیش‌بینی کند، با این حال، آنها دریافتند

که ضرائب کالیبره شده در مناطق مرطوب کمتر و در مناطق خشک بیشتر است که منعکس کننده تفاوت‌های آب و هوایی است. به طور کلی، متون علمی تأکید می‌کنند که مدل‌های تجربی ساده و عملی هستند و از ورودی‌های به آسانی قابل اندازه‌گیری مانند ساعات آفتابی و دما استفاده می‌کنند. آن‌ها به ابزار دقیق پیچیده‌ای نیاز ندارند، که این امر در مناطق خشک با داده‌های کم بسیار مهم است. همانطور که Gürel et al. (۲۰۲۳) اشاره می‌کند، روش‌های تجربی از نظر سهولت استفاده و هزینه‌های محاسباتی کم، همچنان قابل توجه هستند و هر چند در بررسی رویکردهای تخمین تابش خورشیدی، روش‌های ترکیبی و یادگیری ماشین اغلب از نظر دقت از مدل‌های تجربی بهتر عمل می‌کنند، اما فرمول‌های تجربی همچنان به دلیل سادگی خود، در بسیاری از موارد به عملکرد بسیار رضایت‌بخش دست می‌یابند. Karaca (۲۰۲۳) تابش خورشیدی روزانه را در گلخانه‌های نوع مدیترانه‌ای دو شهر آلمریا در اسپانیا و آنتالیا در ترکیه با پنج مدل مبتنی بر دما تخمین زد. او نشان داد که مدل‌های تخمین مبتنی بر دما، جایگزین بسیار مناسبی برای مکان‌هایی هستند که برای تخمین تابش خورشیدی در گلخانه‌ها به رویکرد انتقال نور متکی هستند. Hiben et al. (۲۰۲۶) همچنین نشان داد که روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در مقایسه با روش‌های تجربی در مورد برآورد داده‌های ساعتی تابش خورشیدی در منطقه خشک و نیمه خشک اتیوپی عملکرد بهتر و دقیق‌تری دارند.

با توجه به اهمیت تابش رسیده به سطح زمین و نقش گسترده آن در حوزه‌های مختلف از جمله انرژی، هواشناسی، اقلیم‌شناسی، هیدرولوژی و کشاورزی، هدف از این پژوهش واسنجی و ارزیابی مجموعه‌ای از مدل‌های تجربی برآورد تابش خورشیدی مبتنی بر دما، ساعات آفتابی و سایر پارامترهای هواشناسی در ایستگاه سینوپتیک یزد واقع در اقلیم خشک و گرم است. با وجود اهمیت موضوع، مرور منابع نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای جامع با تمرکز بر مقایسه گسترده این مدل‌ها در ایستگاه یزد انجام نشده است. همچنین، در این پژوهش نتایج حاصل از مدل‌های تجربی با یافته‌های پژوهش سلطانی گردفرامری و عسکری‌زاده (۱۴۰۳) که در همین بازه زمانی و با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در همان ایستگاه سینوپتیک یزد انجام شده است، مورد مقایسه قرار خواهد گرفت تا امکان ارزیابی نسبی عملکرد رویکردهای تجربی در برابر روش‌های نوین مبتنی بر یادگیری ماشین فراهم شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق متغیرهای اقلیمی اندازه‌گیری شده در ایستگاه سینوپتیک یزد طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۳ در مقیاس روزانه می‌باشد. ایستگاه یزد در موقعیت طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۵۴/۲۹۴۲ درجه شرقی و ۳۱/۹۰۷۵ شمالی در ارتفاع ۱۲۱۶ متری از سطح دریا قرار گرفته است. میانگین تابش خورشیدی و تابش فرازمینی در ایستگاه سینوپتیک یزد به ترتیب ۱۹/۳۵ و ۳۲ مگاژول بر متر مربع در روز، نسبت ساعات آفتابی به حداکثر ساعات آفتابی ۰/۷۵، رطوبت نسبی میانگین ۲۷ درصد، دمای میانگین ۲۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با توجه به اینکه داده‌های تابش خورشیدی ثبت شده توسط پیرانومتر ممکن است خارج از محدوده‌های فیزیکی مورد انتظار باشند، لازم است این داده‌ها مورد کنترل کیفیت قرار گیرند. در این راستا، برای شناسایی مقادیر مشکوک یا نادرست، شاخص شفافیت روزانه (K_t) محاسبه شد و داده‌هایی که خارج از بازه $0.15 < K_t < 1$ قرار داشتند حذف شدند (Jiang, 2009). شایان ذکر است که این شاخص برابر نسبت تابش خورشیدی روزانه مشاهده شده به تابش خورشیدی فرازمینی روزانه می‌باشد. همچنین نرمال بودن هر یک از متغیرهای هواشناسی به صورت جداگانه با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مورد ارزیابی قرار گرفت. همگنی هر متغیر هواشناسی نیز به صورت جداگانه با استفاده از آزمون‌های آماری مناسب برای تشخیص تغییرات احتمالی در سری داده‌ها ارزیابی شد. از آمار سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۰ برای واسنجی معادله‌ها و از آمار ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳ برای ارزیابی نتایج استفاده گردید. همچنین مقادیر تابش فرازمینی و حداکثر ساعات روشنایی روزانه که وابسته به عرض جغرافیایی محل و شماره روز سال بر مبنای تقویم میلادی می‌باشند، از روابط (۱) تا (۵) ارائه شده توسط Duffie and Beckman (۲۰۲۰) محاسبه شدند.

$$R_a = \frac{24 \times 3600}{\pi} I_{gs} d_r \left[\cos \varphi \cos \delta \sin w_s + \frac{\pi}{180} \sin \varphi \sin \delta w_s \right] \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$d_r = 1 + 0.033 \left[\cos \frac{360J}{365} \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360(J + 284)}{365} \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$w_s = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \varphi) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$N = \frac{2}{15} w_s \quad \text{رابطه (۵)}$$

جایی که R_a تابش فرازمینی بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز، I_{gs} ثابت خورشیدی و برابر با ۱۳۶۷ وات بر متر مربع، J شماره روز از سال، d_r فاصله نسبی زمین تا خورشید، φ عرض جغرافیایی بر حسب درجه، δ زاویه میل خورشیدی بر حسب درجه، w_s زاویه ساعتی خورشیدی بر حسب درجه و N حداکثر ساعات روشنایی روز است.

۲-۲- معادلات تجربی مورد استفاده

مدل‌های تجربی زیادی برای تخمین تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های هواشناسی توسعه یافته‌اند. در این مطالعه، سه نوع از این مدل‌ها استفاده شدند که بر اساس داده‌های دما ۱۰ مدل، بر اساس داده‌های تابش خورشیدی ۷ مدل و بر اساس سایر داده‌های هواشناسی ۲۴ مدل و در مجموع ۴۱ مدل تجربی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). ضرائب ثابت معادلات با استفاده از تحلیل رگرسیون و در نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ محاسبه گردید. در این معادلات R_s تابش خورشیدی، R_a تابش فرازمینی، n ساعات آفتابی، N حداکثر ساعات آفتابی، Z ارتفاع ایستگاه از سطح دریا، φ عرض جغرافیایی، δ زاویه میل خورشیدی، $T_{\max}$ دمای حداکثر، $T_{\min}$ دمای حداقل، RH رطوبت نسبی، T دمای میانگین روزانه و T_k دمای میانگین مطلق روزانه می‌باشد.

جدول (۱): معادلات تجربی مورد استفاده

شماره معادله	معادله	منبع
معادلات تجربی بر اساس تابش		
۱	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right); a = 0.10 + 0.24\left(\frac{n}{N}\right); b = 0.38 + 0.08\left(\frac{n}{N}\right)$	Angstrom (1924), Prescott (1940), Rietveld (1978)
۲	$a = 0.103 + 0.000017Z + 0.198\cos(\varphi - \delta)$ $b = 0.533 - 0.165\cos(\varphi - \delta)$	Kilic and Ozturk (1983)
۳	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\left(\frac{n}{N}\right)^2$	Ogelman et al. (1984)
۴	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\left(\frac{n}{N}\right)^2 + d\left(\frac{n}{N}\right)^3$	Bahel et al. (1987)
۵	$a = 0.265 + 0.07Z - 0.135\left(\frac{n}{N}\right)$ $b = 0.401 - 0.108Z + 0.325\left(\frac{n}{N}\right)$	Gopinathan (1988)
۶	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c \log\left(\frac{n}{N}\right)$	Newland (1989)
۷	$\frac{R_s}{R_a} = a + b \log\left(\frac{n}{N}\right)$	Ampratwum and Dorvlo (1999)
۸	$\frac{R_s}{R_a} = a + b \exp\left(\frac{n}{N}\right)$	Almorox and Hontoria (2004)
۹	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c \exp\left(\frac{n}{N}\right)$	Bakirci (2009b)
۱۰	$\frac{R_s}{R_a} = a\left(\frac{n}{N}\right)^b$	Bakirci (2009b)
معادلات تجربی بر اساس دما		
۱۱	$\frac{R_s}{R_a} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$	Hargreaves and Samani (1982)
۱۲	$\frac{R_s}{R_a} = a(T_{\max} - T_{\min})^b$	Richardson (1985)
۱۳	$R_s = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a + b$	Hunt et al. (1998)
۱۴	$\frac{R_s}{R_a} = a(1 + 2.7 \times 10^{-5}Z)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$	Annandale et al. (2002)
۱۵	$\frac{R_s}{R_a} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + b$	Chen et al. (2004)
۱۶	$\frac{R_s}{R_a} = a \ln(T_{\max} - T_{\min}) + b$	Chen et al. (2004)
۱۷	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{T_{\max}}{65}\right)$	Mubiru et al. (2007)
معادلات تجربی بر اساس سایر پارامترهای هواشناسی		
۱۸	$R_s = a\left(\frac{n}{N}\right)^b RH^c$	Swartman and Ogunlade (1967)
۱۹	$R_s = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + cRH$	Swartman and Ogunlade (1967)
۲۰	$R_s = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + cw; w = 0.0049RH\left(\frac{\exp(26.23 - (\frac{5416}{T_k}))}{T_k}\right)$	Garg and Garg (1983)
۲۱	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\delta + cw; w = 0.0049RH\left(\frac{\exp(26.23 - (\frac{5416}{T_k}))}{T_k}\right)$	Garg and Garg (1983)
۲۲	$R_s = aRH^b$	Lewis (1983)
۲۳	$R_s = an^b RH^c$	Lewis (1983)
۲۴	$R_s = a \exp(bn)$	Lewis (1983)
۲۵	$R_s = a \exp(bRH)$	Lewis (1983)

Abdalla (1994)	$\frac{R_s}{R_n} = a + b \left(\frac{n}{N}\right) + cT + dRH$	۲۶
Ododo et al. (1995)	$\frac{R_s}{R_n} = a \left(\frac{n}{N}\right)^b T_{max}^c RH^d$	۲۷
Ododo et al. (1995)	$\frac{R_s}{R_n} = a + b \left(\frac{n}{N}\right) + cT_{max} + dRH + eT_{max} \left(\frac{n}{N}\right)$	۲۸
Togrul and Onat (1999)	$R_s = b \sin \delta$	۲۹
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + bR_a$	۳۰
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + bR_a + c \left(\frac{n}{N}\right)$	۳۱
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + b \left(\frac{n}{N}\right) + c \sin \delta$	۳۲
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + b \left(\frac{n}{N}\right) + c \sin \delta + dT$	۳۳
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + bR_a + c \left(\frac{n}{N}\right) + d nT$	۳۴
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + bR_a + c \left(\frac{n}{N}\right) + d RH + e nT$	۳۵
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + b \sin \delta + c \left(\frac{n}{N}\right) + d RH + e T$	۳۶
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + bR_a + c \left(\frac{n}{N}\right) + d \sin \delta + e RH + f T$	۳۷
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + bR_a + c \left(\frac{n}{N}\right) + d RH + e nT + f T$	۳۸
Togrul and Onat (1999)	$R_s = a + bR_a + c \left(\frac{n}{N}\right) + d \sin \delta + e RH + f nT + g T$	۳۹
Mubiru et al. (2007)	$\frac{R_s}{R_a} = a + b \left(\frac{n}{N}\right) + c \left(\frac{T_{max}}{65}\right)$	۴۰
Mubiru et al. (2007)	$\frac{R_s}{R_a} = a + bRH$	۴۱

۳-۲- معیارهای ارزیابی مدل

از جمله معیارهای ارزیابی پرکاربرد ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، قدر مطلق میانگین خطا (MAE) و ضریب تبیین (R^2) می‌باشند که به ترتیب در روابط (۶) تا (۸) آورده شده است. دقیق‌ترین مدل با توجه به این معیارها، مدلی خواهد بود که مقدار این سه معیار به ترتیب نزدیک به صفر، صفر و یک باشد. در این روابط N تعداد مشاهدات، O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده و برآورد شده و P_{ave} و O_{ave} به ترتیب میانگین مقادیر برآورد شده و مشاهده شده می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{ave})(P_i - P_{ave})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (O_i - O_{ave})^2)(\sum_{i=1}^N (P_i - P_{ave})^2)}} \right)^2 \quad \text{رابطه (۸)}$$

۳- نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل رگرسیونی برای ۴۱ مدل تجربی در ایستگاه سینوپتیک یزد و با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده تابش خورشیدی روزانه انجام گرفت، ضرائب تجربی مدل‌ها محاسبه گردید و نتایج در جدول (۲) ارائه شد. جدول (۳) نیز بر اساس ضرایب محاسبه شده هر مدل، مقایسه مدل‌های تجربی بر اساس مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، قدر مطلق میانگین خطا (MAE) و ضریب تبیین (R^2) را نشان می‌دهد. به‌طور کلی هر چه مقادیر شاخص‌های ارزیابی، پایین‌تر و میزان شاخص R^2 بالاتر باشد، مدل مربوطه دقیق‌تر و مناسب‌تر خواهد بود. طبق نتایج جدول (۳) در بین مدل‌های مبتنی بر تابش خورشیدی معادله شماره (۳) از Ogelman et al. (۱۹۸۴) با ضریب تبیین ۰/۶۸۶ و از میان مدل‌های بر اساس پارامتر دما معادله شماره ۱۷ از Mubiru et al. (۲۰۰۷) با ضریب تبیین ۰/۶۵۴ در بین گروه معادلات تابش و دما نتیجه بهتری را نشان دادند. مدل شماره ۳۴ (مدل Togrul and Onat, 1999) که بر اساس داده‌های هواشناسی دمای میانگین، تابش فرازمینی، ساعات آفتابی و حداکثر ساعات آفتابی، تابش خورشیدی را تخمین می‌زند، بهترین نتیجه را نسبت به سایر مدل‌های تجربی کسب کرد؛ به‌طوری که ضریب تبیین برابر با ۰/۷۵، میانگین مربعات خطای برابر با ۱/۸۹۲ و قدر مطلق میانگین خطای برابر با ۱/۲۶۳ حاصل شد. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، مدل‌هایی که تنها بر یک متغیر ورودی مبتنی بر تابش خورشیدی هستند، از دقت پایین‌تری نسبت به سایر رویکردها برخوردارند. در مقابل، مدل‌های مبتنی بر دما عملکرد متوسطی داشته و مدل‌هایی که از مجموعه‌ای از پارامترهای هواشناسی شامل دما، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی استفاده می‌کنند، بالاترین دقت را در برآورد تابش خورشیدی روزانه ارائه دادند. این یافته با نتایج فولادمند و کریمی (۱۳۹۶) همخوانی دارد که نشان دادند استفاده

صرف از متغیرهای دمایی برای برآورد تابش خورشیدی در اقلیم شیراز کارایی مطلوبی ندارد و نقش ساعات آفتابی در بهبود دقت مدل‌ها ضروری است. همچنین، نتایج جهان‌تبع و پیری (۱۴۰۲) نیز مؤید این موضوع است که ترکیب چندین پارامتر هواشناسی مانند دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، تبخیر و سرعت باد موجب افزایش دقت مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران می‌شود. در مطالعه حاضر نیز مشخص شد که افزایش تعداد متغیرهای ورودی و استفاده از اطلاعات ترکیبی هواشناسی، منجر به بهبود عملکرد مدل‌ها در اقلیم گرم و خشک یزد شده است. این موضوع با یافته‌های سیدیان و همکاران (۱۳۹۶) نیز قابل مقایسه است؛ به گونه‌ای که آنان نشان دادند اهمیت متغیرهای مؤثر بر تابش خورشیدی در ایستگاه‌های مختلف یکسان نبوده و دمای بیشینه و ساعات آفتابی در اغلب ایستگاه‌ها نقش کلیدی دارند، هرچند سایر متغیرها نیز بسته به شرایط اقلیمی اهمیت متفاوتی دارند. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش با یافته‌های سلطانی گردفرامرز و مومنی (۱۴۰۲) نیز هم‌راستا است که نشان دادند استفاده از مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی و نجومی در مدل‌های یادگیری ماشین منجر به افزایش دقت پیش‌بینی تابش خورشیدی می‌شود و روش‌هایی مانند ماشین‌بردار پشتیبان عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارند. با این حال، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که حتی در غیاب روش‌های پیچیده یادگیری ماشین، مدل‌های تجربی چندمتغیره نیز می‌توانند عملکرد قابل قبولی در اقلیم یزد ارائه دهند. همچنین، نتایج زندسلیمی و همکاران (۱۴۰۳) در خصوص واسنجی مدل آنگستروم-پرسکات نیز نشان‌دهنده اهمیت ضرایب محلی در بهبود دقت مدل‌های تجربی است که این موضوع با نتایج این پژوهش در خصوص ضرورت تنظیم و واسنجی مدل‌ها برای شرایط اقلیمی یزد هم‌خوانی دارد.

جدول (۲): ضرایب معادلات تجربی مورد استفاده

نوع معادله	شماره معادله	ضرایب معادلات تجربی						
		a	b	c	d	e	f	g
معادلات بر اساس تابش	۱	۰/۲۸۲	۰/۴۴۱					
	۲	۰/۳۰۰	۰/۳۸۶					
	۳	۰/۳۷۲	-۰/۵۰۴	۰/۹۸۷				
	۴	۰/۱۲۹	۱/۴۶۷	-۲/۹۱۵	۲/۲۲۹			
	۵	۰/۲۴۸	۰/۵۱۶					
	۶	-۰/۲۸۶	۱/۰۸۲	-۰/۴۳۰				
	۷	۰/۵۶۵	۰/۶۸۷					
	۸	۰/۳۸۱	-۰/۲۲۹					
	۹	-۰/۷۷۸	-۱/۴۲۲	۱/۱۲۹				
	۱۰	۰/۶۷۹	۰/۵۳۶					
معادلات بر اساس دما	۱۱	۰/۲۹۶						
	۱۲	۰/۱۴۷	۰/۵۱۸					
	۱۳	۰/۰۰۴	۰/۱۵۴					
	۱۴	۰/۱۵۶						
	۱۵	۰/۱۲۹	۰/۱۲۰					
	۱۶	۰/۲۳۷	-۰/۰۱۸					
	۱۷	۰/۹۸۳	۰/۱۹۶					
معادلات بر اساس سایر پارامترهای هواشناسی	۱۸	۴۵/۵۳۶	۰/۵۸۷	-۰/۲۲۶				
	۱۹	۱۰/۸۷۱	۱۵/۹۵۱	-۰/۱۳۲				
	۲۰	-۱/۰۱۲	۲۳/۷۰۵	۲/۶۰۷				
	۲۱	۲۰/۶۹۷	-۲۶/۵۸۶	-۱/۰۸۶				
	۲۲	۶۵/۱۵۷	-۰/۴۰۹					
	۲۳	۱۰/۸۵۷	۰/۵۷۶	-۰/۲۲۸				
	۲۴	۶/۳۶۸	۰/۱۱۵					
	۲۵	۲۶/۷۴۹	-۰/۰۱۴					
	۲۶	۰/۰۴۷	۰/۴۶۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱			
	۲۷	۰/۲۱۱	۰/۵۱۴	۰/۴۰۲	-۰/۰۳۸			
	۲۸	۰/۱۰۸	۰/۲۹۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶		
	۲۹		۲۳/۳۹۷					
	۳۰	۵۱/۲۸۹	-۰/۹۸۸					
	۳۱	۷۶/۱۷۷	-۲/۲۹۶	۲۲/۹۳۳				
	۳۲	۴/۰۹۳	۲۳/۵۱۰	-۴/۱۸۳				
	۳۳	۲/۶۹۹	۱۶/۱۵۹	-۵/۱۸	۰/۳۸۵			
	۳۴	۱۰۷/۹۳	-۳/۱۵۷	۸/۲۶۶	۰/۰۳۸			
	۳۵	۱۰۷/۲۱۳	-۳/۱۰۲	۸/۰۶۵	-۰/۱۹	۰/۰۳۶		
	۳۶	۱/۶۵۲	-۵/۲۵۸	۱۶/۵۹۵	۰/۰۱۶	۰/۴۰۲		
	۳۷	-۸۱/۸۲۲	۲/۶۲۹	۱۶/۸۳۷	-۸/۱۵۹	۰/۰۱۸	۰/۴۰۳	
	۳۸	۱۰۲/۸۴۵	-۳/۱۲۱	۱۳/۱۳۲	-۰/۰۰۱	۰/۱۲	۰/۲۶۱	
	۳۹	-۹۸/۲۹۶	۳/۳۳۷	۹/۹۹۹	-۹/۲۲۷	۰/۰۰۵	۰/۰۳۲	۰/۰۷۸
	۴۰	-۰/۰۱۸	۰/۴۴۵	۰/۶۸۵				
	۴۱	۰/۷۹۷	-۰/۰۰۷۳					

جدول (۳): نتایج شاخص‌های آماری برای معادلات تجربی

نوع معادله	شماره معادله	RMSE (MJ m ⁻² day ⁻¹)	MAE (MJ m ⁻² day ⁻¹)	R ²
معادلات بر اساس تابش	۱	۳/۶۶۴	۱/۹۲۵	۰/۵۵۰
	۲	۳/۷۸۲	۲/۳۱۱	۰/۵۲۰
	۳	۲/۳۵۴	۱/۳۴۵	۰/۶۸۶
	۴	۲/۳۲۴	۱/۳۲۴	۰/۵۸۸
	۵	۳/۶۵۸	۱/۸۸۶	۰/۶۲۱
	۶	۳/۲۲۴	۱/۳۸۷	۰/۵۷۲
	۷	۳/۶۳۴	۱/۸۵۶	۰/۴۴۵
	۸	۳/۴۲۵	۱/۴۳۹	۰/۵۶۶
	۹	۳/۲۱۴	۱/۳۷۴	۰/۴۷۵
	۱۰	۳/۵۵۹	۱/۸۴۷	۰/۴۵۰
معادلات بر اساس دما	۱۱	۳/۹۴۴	۲/۷۴۱	۰/۵۵۸
	۱۲	۳/۹۶۵	۲/۸۵۶	۰/۴۶۵
	۱۳	۳/۹۸۷	۲/۹۷۴	۰/۴۵۲
	۱۴	۳/۸۳۴	۲/۶۳۴	۰/۶۰۲
	۱۵	۳/۸۲۳	۲/۵۶۱	۰/۶۱۳
	۱۶	۳/۶۵۴	۱/۸۷۷	۰/۶۴۱
	۱۷	۳/۵۵۶	۱/۸۳۶	۰/۶۵۴
معادلات بر اساس سایر پارامترهای هواشناسی	۱۸	۳/۴۳۶	۱/۴۴۷	۰/۷۲۵
	۱۹	۳/۵۴۵	۱/۷۲۵	۰/۷۱۷
	۲۰	۳/۵۳۶	۱/۶۳۵	۰/۷۰۸
	۲۱	۴/۰۲۳	۳/۲۳۴	۰/۶۵۰
	۲۲	۳/۹۳۲	۱/۳۶۷	۰/۷۱۸
	۲۳	۲/۵۶۳	۱/۳۵۶	۰/۷۱۲
	۲۴	۲/۶۵۸	۱/۳۵۹	۰/۷۰۵
	۲۵	۳/۳۲۵	۱/۴۲۳	۰/۷۱۰
	۲۶	۱/۸۹۴	۱/۳۷۹	۰/۷۲۲
	۲۷	۱/۹۹۵	۱/۳۷۸	۰/۷۳۱
	۲۸	۱/۹۹۷	۱/۳۸۳	۰/۷۱۰
	۲۹	۳/۷۸۹	۲/۴۱۵	۰/۶۸۵
	۳۰	۴/۱۸۵	۳/۵۶۲	۰/۷۴۰
	۳۱	۳/۴۳۹	۱/۵۶۲	۰/۷۲۱
	۳۲	۲/۷۸۶	۱/۳۶۴	۰/۷۱۸
	۳۳	۱/۹۷۵	۱/۳۶۹	۰/۷۲۷
	۳۴	۱/۸۹۲	۱/۲۶۳	۰/۷۵۰
	۳۵	۲/۱۲۳	۱/۳۸۶	۰/۷۲۹
	۳۶	۲/۸۷۴	۱/۳۶۸	۰/۷۱۷
	۳۷	۲/۵۲۳	۱/۲۹۵	۰/۷۱۲
	۳۸	۲/۶۵۲	۱/۳۶۸	۰/۷۳۲
	۳۹	۲/۵۱۲	۱/۳۸۶	۰/۷۱۰
	۴۰	۲/۹۷۴	۱/۳۹۶	۰/۷۵۰
	۴۱	۳/۶۴۸	۱/۸۶۴	۰/۷۳۹

با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های ترکیبی (چندمتغیره) از دیدگاه هواشناسی، هیدرولوژی و فیزیک جو عملکرد بهتری در برآورد تابش خورشیدی دارند، زیرا تابش خورشیدی در سطح زمین حاصل برهم‌کنش هم‌زمان چندین فرآیند جوی است و یک متغیر به‌تنهایی نمی‌تواند تمام این فرآیندها را توصیف کند. به عبارت دیگر، تغییرات تابش خورشیدی تنها تابع موقعیت خورشید نیست، بلکه تحت تأثیر ابرناکی، بخار آب، ذرات معلق، ویژگی‌های حرارتی جو و شرایط محلی نیز قرار دارد. مهم‌ترین دلایل برتری مدل‌های ترکیبی عبارت‌اند از:

۱- نمایش بهتر فرآیندهای فیزیکی مؤثر بر تابش خورشیدی: هر یک از متغیرهای هواشناسی بخشی از فرآیندهای کنترل‌کننده تابش خورشیدی را بیان می‌کنند. برای مثال، ساعات آفتابی بیانگر میزان ابرناکی و مدت واقعی دریافت تابش مستقیم است، دمای هوا نشان‌دهنده پاسخ حرارتی سطح زمین به انرژی دریافتی است و رطوبت نسبی بیانگر میزان بخار آب موجود در جو و جذب و پراکندگی تابش است. بنابراین، ترکیب این متغیرها تصویر کامل‌تری از شرایط حاکم بر انتقال تابش در جو ارائه می‌دهد (Valiantzas, 2018).

۲- کاهش عدم قطعیت ناشی از اتکا به یک متغیر: متغیرهایی مانند دمای هوا اگرچه با تابش خورشیدی همبستگی دارند، اما تحت تأثیر عوامل دیگری مانند جابه‌جایی توده‌های هوا، باد، تبادل گرمایی سطح و ویژگی‌های محلی نیز قرار می‌گیرند. بنابراین استفاده از دما به‌تنهایی می‌تواند باعث افزایش خطای مدل شود. ورود متغیرهای مکمل موجب جبران این محدودیت و کاهش خطای برآورد می‌شود (Aleksandar and Branislava, 2014).

۳- در نظر گرفتن اثرات مستقیم و غیرمستقیم جو: تابش خورشیدی هنگام عبور از جو تحت تأثیر جذب و پراکندگی ناشی از بخار آب، ابرها، ذرات معلق و گازهای جوی قرار می‌گیرد. متغیرهایی مانند رطوبت نسبی و ساعات آفتابی به‌طور غیرمستقیم این اثرات را منعکس می‌کنند؛ در نتیجه مدل قادر است تغییرات واقعی تابش را بهتر بازسازی کند (Banihashemi Dehkordi et al., 2022).

۴- وجود روابط غیرخطی بین متغیرهای هواشناسی: ارتباط بین تابش خورشیدی و متغیرهای هواشناسی کاملاً خطی نیست. برای مثال، در شرایط رطوبت بالا ممکن است کاهش تابش بسیار بیشتر از حالتی باشد که تنها تغییر دما مدنظر قرار گیرد. استفاده هم‌زمان از چند متغیر امکان مدل‌سازی بهتر این روابط پیچیده و برهم‌کنش‌های بین آن‌ها را فراهم می‌کند (Katiyar and Pandey, 2013).

۵- ویژگی‌های اقلیم گرم و خشک یزد: در اقلیم یزد، اگرچه تعداد روزهای آفتابی زیاد است، اما تغییرات رطوبت، وقوع گردوغبار، آتروسل‌های جوی و تغییرات فصلی شفافیت جو می‌توانند مقدار تابش دریافتی را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهند. از این‌رو استفاده از متغیرهایی مانند رطوبت نسبی و ساعات آفتابی در کنار دما باعث می‌شود این تغییرات بهتر در مدل منعکس شوند و دقت تخمین افزایش یابد (Banihashemi Dehkordi et al., 2022).

۶- پوشش بهتر تغییرپذیری زمانی: برخی متغیرها تغییرات روزانه تابش را بهتر توضیح می‌دهند (مانند ساعات آفتابی)، در حالی که برخی دیگر تغییرات فصلی یا شرایط جوی را منعکس می‌کنند (مانند دما و رطوبت نسبی). ترکیب این اطلاعات موجب می‌شود مدل بتواند تغییرات تابش را در مقیاس‌های زمانی مختلف با دقت بیشتری پیش‌بینی کند (Katiyar and Pandey, 2013).

در مجموع، برتری مدل‌های ترکیبی ناشی از آن است که این مدل‌ها اطلاعات مکمل و مستقل چندین فرآیند مؤثر بر انتقال تابش در جو را به‌صورت هم‌زمان در نظر می‌گیرند. این موضوع موجب کاهش عدم قطعیت، افزایش توان تبیین تغییرات تابش خورشیدی و بهبود شاخص‌های آماری مانند ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین قدرمطلق خطا می‌شود. از این‌رو، در اقلیم گرم و خشک یزد نیز مشاهده شد که مدل‌های چندمتغیره نسبت به مدل‌های مبتنی بر یک متغیر، عملکرد دقیق‌تر و پایدارتری در برآورد تابش خورشیدی روزانه دارند؛ نتیجه‌ای که با مبانی فیزیک انتقال تابش و یافته‌های مطالعات پیشین نیز سازگار است.

در ادامه بخشی از نتایج تحقیق سلطانی گردفرامرز و عسکری‌زاده (۱۴۰۳) که در بازه زمانی و داده‌های ورودی مشابه با این تحقیق انجام شده است، در جدول (۴) مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج جدول (۴)، مشخص است که در مطالعه سلطانی گردفرامرز و عسکری‌زاده (۱۴۰۳) نیز الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، به‌ویژه مدل‌های XGB و SVR، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها در برآورد تابش خورشیدی نشان داده‌اند. در مرحله آزمون، مدل XGB با RMSE برابر ۱/۹۷۲ و R^2 معادل ۰/۸۷۲ و همچنین SVR با R^2 برابر ۰/۸۹۳ از دقت بالاتری نسبت به مدل‌های کلاسیک‌تر مانند درخت تصمیم و KNN برخوردار بوده‌اند. در مقابل، مدل‌های خطی مانند رگرسیون خطی (LR) و همچنین KNN و DT دارای خطای بیشتر و دقت پایین‌تری بوده‌اند.

جدول (۴): مدل‌سازی تابش خورشیدی در مرحله آموزش و آزمون مدل (سلطانی گردفرامرز و عسکری‌زاده، ۱۴۰۳)

مدل	RMSE	MAE	R^2
مرحله آموزش			
XGB	۰/۴	۰/۲۶۶	۰/۹۹۶
RF	۰/۸۲۹	۰/۴۰۳	۰/۹۸۲
LR	۲/۱۴۵	۱/۰۸۷	۰/۸۷۶
SVR	۲/۱۰۳	۰/۸۹۴	۰/۸۸۱
KNN	۱/۹۱۵	۱/۰۴۱	۰/۹۰۱
DT	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰
مرحله آزمون			
XGB	۱/۹۷۲	۱/۱۲۰	۰/۸۷۲
RF	۱/۸۰۷	۰/۹۶۸	۰/۸۱۵
LR	۱/۷۷۰	۱/۰۰	۰/۸۲۶
SVR	۱/۷۳۲	۰/۸۲۶	۰/۸۹۳
KNN	۲/۰۲۶	۱/۱۲۵	۰/۷۹۰
DT	۲/۷۲۷	۱/۳۷۳	۰/۷۹۶

این نتایج با یافته‌های این تحقیق هم‌راستا بوده و نشان می‌دهد که مدل‌های یادگیری ماشین به‌ویژه روش‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی و کرنلی، در مقایسه با روش‌های ساده‌تر توانایی بهتری در شبیه‌سازی روابط غیرخطی بین متغیرهای هواشناسی و تابش خورشیدی دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مرحله آزمون از نظر دقت برآورد تابش خورشیدی، به نتایج برخی از مدل‌های تجربی مورد استفاده در این مطالعه نزدیک بوده و در برخی موارد اختلاف اندکی با آن‌ها دارد. به‌ویژه، مقادیر خطا در مدل‌های یادگیری ماشین در محدوده‌ای قرار گرفت که قابل مقایسه با بهترین مدل‌های تجربی چندمتغیره در این تحقیق است، اگرچه در برخی موارد مدل‌های تجربی ساده‌تر نیز توانستند عملکرد رقابتی از خود نشان دهند. این یافته‌ها با نتایج Attaya et al. (۲۰۲۵) در کشور ترکیه هم‌راستا است؛ به‌طوری که آن‌ها نیز گزارش کردند الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مقایسه با مدل‌های تجربی، بهبود قابل توجهی در دقت پیش‌بینی تابش خورشیدی ایجاد می‌کنند، اما این برتری در همه شرایط مطلق نیست.

و در برخی شرایط اقلیمی، اختلاف عملکرد میان دو رویکرد کاهش می‌یابد. در واقع، نتایج هر دو مطالعه نشان می‌دهد که هرچند روش‌های یادگیری ماشین به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط غیرخطی معمولاً دقت بالاتری دارند، اما در اقلیم‌های گرم و خشک مانند منطقه مورد مطالعه، مدل‌های تجربی نیز می‌توانند عملکردی نزدیک و قابل قبول ارائه دهند.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت برآورد دقیق تابش خورشیدی در فرایندهای هیدرولوژیکی و ضرورت استفاده از روش‌های تجربی در شرایط کمبود داده‌های اندازه‌گیری، در این پژوهش مجموعه‌ای از مدل‌های تجربی مبتنی بر متغیرهای هواشناسی شامل دما (حداقل، حداکثر و میانگین)، ساعات آفتابی، تابش فرازمینی، رطوبت نسبی و پارامترهای نجومی نظیر عرض جغرافیایی و زاویه میل خورشیدی برای ایستگاه سینوپتیک یزد و اسنجدی و ارزیابی شد و سپس بر اساس ضرایب به‌دست‌آمده، تابش خورشیدی روزانه این ایستگاه برآورد گردید. نتایج نشان داد که مدل‌های چندمتغیره که از ترکیب پارامترهایی نظیر دمای میانگین، تابش فرازمینی و شاخص‌های مرتبط با ساعات آفتابی استفاده می‌کنند، عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته و دقت بالاتری در تخمین تابش خورشیدی روزانه ارائه داده‌اند. این امر نشان‌دهنده نقش مهم ترکیب متغیرهای فیزیکی و اقلیمی در بهبود عملکرد مدل‌های تجربی در اقلیم گرم و خشک یزد است. با وجود اینکه روش‌های نوین مانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین و رویکردهای ترکیبی معمولاً از دقت بالاتری نسبت به مدل‌های تجربی برخوردارند، نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های تجربی در صورت واسنجی مناسب همچنان می‌توانند عملکرد قابل قبول و قابل اتکایی ارائه دهند، به‌ویژه در شرایطی که محدودیت داده وجود دارد و پیچیدگی مدل‌سازی باید کاهش یابد. با این حال، مدل‌های تجربی دارای محدودیت‌هایی نیز هستند. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، وابستگی مکانی ضرایب مدل است؛ به‌گونه‌ای که مدلی که در یک اقلیم عملکرد مناسبی دارد، ممکن است در اقلیم دیگر کارایی مطلوبی نداشته باشد و بنابراین واسنجی محلی برای هر منطقه ضروری است. همچنین این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی کامل اثرات پیچیده جوی مانند تغییرات سریع پوشش ابر و آتروسول‌ها نیستند و در نتیجه ممکن است نسبت به روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین یا مدل‌های داده‌محور خطای بیشتری داشته باشند. از سوی دیگر، کیفیت و کامل بودن داده‌های ورودی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت این مدل‌ها دارد؛ زیرا وجود خطا یا نقص در داده‌های هواشناسی می‌تواند مستقیماً بر نتایج برآورد تأثیر بگذارد. بر این اساس، استفاده از روش‌های کالیبراسیون محلی، خوشه‌بندی اقلیمی و بهره‌گیری هم‌زمان از داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اعتماد مدل‌های تجربی کمک کند. در نهایت، توسعه پایگاه‌های داده بلندمدت و استفاده ترکیبی از منابع مختلف داده‌ای می‌تواند گامی مؤثر در ارتقای برآورد تابش خورشیدی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد.

منابع

- آقاشریعتمداری، ز.، خلیلی، م.، ایران‌نژاد، پ.، و لیاقت، ع. (۱۳۹۰). واسنجی و تغییرات سالانه ضرایب رابطه انگستروم- پرسکات (a) و (b) و در مقیاس‌های زمانی مختلف (مطالعه موردی: ایستگاه تهران شمال اقدسیه). آب و خاک، ۲۵(۴)، ۹۰۵-۹۱۱.
- جهان‌تیغ، ه.، و پیری، ج. (۱۴۰۲). تخمین میزان تابش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران با استفاده از روش‌های هیبریدی یادگیری ماشین. علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۲۵(۲)، ۳۷-۵۴.
- زند سلیمی، س.، عبدی، ج.، و زارع ایبانه، ح. (۱۴۰۳). تخمین مقادیر تابش خورشیدی با استفاده از معادله انگستروم- پرسکات و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (مطالعه موردی شهر سندر). هواشناسی کشاورزی، ۱۲(۲)، ۳۶-۴۱.
- سلطانی گردفرامری، س. (۱۴۰۲). پیش‌بینی تابش خورشیدی در ایستگاه یزد با به‌کارگیری مدل رگرسیونی مبتنی بر مؤلفه‌های اصلی (PCR). هواشناسی کشاورزی، ۱۱(۱)، ۶-۱۶.
- سلطانی گردفرامری، س.، و مومنی، ه. (۱۴۰۲). کاربست الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تخمین تابش خورشیدی (مورد مطالعه: اقلیم خشک و نیمه‌خشک). ژئوفیزیک ایران، ۲۵-۳۹، ۱۷(۴).
- سلطانی گردفرامری، س.، و عسکری‌زاده، م. (۱۴۰۳). کاربرد تئوری آنتروپی و تحلیل مولفه اصلی جهت تعیین متغیرهای ورودی تخمین تابش خورشیدی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۶(۴)، ۷۳-۸۷.
- سیدیان، م.، فراستی، م.، روحانی، ح.، و حشمت‌پور، ع. (۱۳۹۶). تخمین تابش خورشیدی با استفاده از پارامترهای هواشناسی. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۱)، ۸۸-۱۰۰.
- فولادمند، ح.، و کریمی، ف. (۱۳۹۶). واسنجی و ارزیابی مدل‌های مختلف تخمین تابش خورشیدی روزانه در مقیاس‌های زمانی فصلی و سالانه در منطقه شیراز. آب و خاک، ۳۱(۱)، ۳۲۱-۳۳۰.
- Abdalla, Y.A. (1994). New correlations of global solar radiation with meteorological parameters for Bahrain. International Journal of Solar Energy, 16(2), 111-120.
- Aleksandar, J., and Branislava, L. (2014). Analysis of statistical methods for estimating solar radiation. Geographica Pannonica, 18(1), 1-5.
- Ali, M.A., Elsayed, A., Elkabani, I., Youssef, M.E., and Hassan, G.E. (2025). Evaluation and performance comparison of different models for global solar radiation forecasting: a case study on five cities. Environment, Development and Sustainability, 27(5), 10159-10201.
- Almorox, J.Y., and Hontoria, C.J.E.C. (2004). Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. Energy Conversion and Management, 45(9-10), 1529-1535.
- Ampratwum, D.B., and Dorvlo, A.S. (1999). Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. Applied Energy, 63(3), 161-167.

- Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation, Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50(210), 121-126.
- Annandale, J.G., Jovanic, N.Z., Benade, N., and Allen, R.G. (2002). Software for missing data error analysis of PenmanMonteith reference evapotranspiration. *Irrigation Science*, 21(2), 57-67.
- Attya, M., Abo-Seida, O.M., Abdulkader, H.M., and Mohammed, A.M. (2025). Advanced solar radiation prediction using combined satellite imagery and tabular data processing. *Scientific Reports*, 15(1), 14035.
- Bahel, V., Bakhsh, H., and Srinivasan, R. (1987). A correlation for estimation of global solar radiation. *Energy*, 12(2), 131-135.
- Bakirci, K. (2009). Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy*, 34(4), 485-501.
- Banihashemi Dehkordi, S.N., Bakhtiari, B., Qaderi, K., and Ahmadi, M.M. (2022). Calibration and validation of the Angstrom–Prescott model in solar radiation estimation using optimization algorithms. *Scientific Reports*, 12(1), 4855.
- Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., and Zhao, W. (2004). Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), 1759-1769.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. and Blair, N. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, 928p.
- Garg, H.P., and Garg, S.N. (1983). Prediction of global solar radiation from bright sunshine hours and other meteorological data. *Energy Conversion and Management*, 23(2), 113-118.
- Gopinathan, K.K. (1988). A simple method for predicting global solar radiation on a horizontal surface. *Solar & Wind Technology*, 5(5), 581-583.
- Gürel, A.E., Ağbulut, Ü., Bakır, H., Ergün, A., and Yıldız, G. (2023). A state of art review on estimation of solar radiation with various models. *Heliyon*, 9(2), e13167.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.
- Hiben, Y.G., Kahsay, M.B., and Lauwaert, J. (2026). Comparative study of solar radiation estimation models based on sunshine duration and irradiance measurements in the Tigray Region, Ethiopia. *Energy Conversion and Management: X*, 30, 101607.
- Hunt, L.A., Kuchar, C., and Swanton, C.J. (1998). Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91(3-4), 293-300.
- Jiang, Y. (2009). Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China. *Applied Energy*, 86(9), 1458-1464.
- Karaca, C. (2023). Estimation of daily global solar radiation based on different whitening applications using temperature in Mediterranean type greenhouses. *Italian Journal of Agrometeorology*, 1(1), 79-93.
- Katiyar, A.K., and Pandey, C.K. (2013). A review of solar radiation models- Part I. *Journal of Renewable Energy*, 2013(1), 168048.
- Kilic, A., Ozturk, A. (1983). *Solar Energy*. Kipas Yayincilik, Istanbul (in Turkish).
- Lewis, G. (1983). Estimates of irradiance over Zimbabwe. *Solar Energy*, 31(6), 609-612.
- Marzo, A., Trigo-Gonzalez, M., Alonso-Montesinos, J., Martínez-Durbán, M., López, G., Ferrada, P., Fuentealba, E., Cortés, M., and Batlles, F.J. (2017). Daily global solar radiation estimation in desert areas using daily extreme temperatures and extraterrestrial radiation. *Renewable Energy*, 113, 303-311.
- Mohammadi, B., and Moazenzadeh, R. (2021). Performance analysis of daily global solar radiation models in Peru by regression analysis. *Atmosphere*, 12(3), 389.
- Mubiru, J., Banda, E.J.K.B., D'Ujanga, F., and Senyonga, T. (2007). Assessing the performance of global solar radiation empirical formulations in Kampala, Uganda. *Theoretical and Applied Climatology*, 87(1), 179-184.
- Naserpour, S., Zolfaghari, H., and Firouzabadi, P.Z. (2020). Calibration and evaluation of sunshine-based empirical models for estimating daily solar radiation in Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42(2213-1388), 1-13.
- Newland, F.J. (1989). A study of solar radiation models for the coastal region of South China. *Solar Energy*, 43(4), 227-235.
- Ododo, J.C., Sulaiman, A.T., Aidan, J., Yuguda, M.M., and Ogbu, F.A. (1995). The importance of maximum air temperature in the parameterisation of solar radiation in Nigeria. *Renewable Energy*, 6(7), 751-763.
- Ögelman, H., Ecevit, A., and Tasdemiroğlu, E. (1984). A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. *Solar Energy*, 33(6), 619-625.
- Prescott, J.A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 46, 114-118.
- Raziei, T., and Pereira, L.S. (2013). Estimation of ETo with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121, 1-18.
- Richardson, C.W. (1985). Weather simulation for crop management models. *Transactions of the ASAE*, 28(5), 1602-1606.
- Rietveld, M.R. (1978). A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agricultural Meteorology*, 19(2-3), 243-252.
- Swartman, R.K., and Ogunlade, O. (1967). Solar radiation estimates from common parameters. *Solar Energy*, 11(3-4), 170-172.
- Tabari, H., Hosseinzadehtalaei, P., Willems, P., and Martinez, C. (2016). Validation and calibration of solar radiation equations for estimating daily reference evapotranspiration at cool semi-arid and arid locations. *Hydrological Sciences Journal*, 61(3), 610-619.
- Toğrul, I.T., and Onat, E. (1999). A study for estimating solar radiation in Elazığ using geographical and meteorological data. *Energy Conversion and Management*, 40(14), 1577-1584.
- Valiantzas, J.D. (2018). Modification of the Hargreaves–Samani model for estimating solar radiation from temperature and humidity data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(1), 06017014.
- Yadav, A.K., Kumar, R., Wang, M., Fekete, G., and Singh, T. (2025). Comparative analysis of daily global solar radiation prediction using deep learning models inputted with stochastic variables. *Scientific Reports*, 15(1), 10786.

Calibration and Evaluation of Various Empirical Models for Estimating Daily Solar Radiation in Yazd Synoptic Station

Somayeh Soltani-Gerdefaramarzi^{*1}



Research Article

1. Associate Professor, Department of water sciences and engineering, Ardakan university, Ardakan, Iran.

ssoltani@ardakan.ac.ir

* Corresponding author

Article Code: 2604-1159

Countinus Pagination: 1352-1362

Received: 18 April 2026

Accepted: 26 July 2026

Online: 02 August 2026

Review speed: 100 days

Citation:

Soltani-Gerdefaramarzi, S. (2026). Calibration and Evaluation of Various Empirical Models for Estimating Daily Solar Radiation in Yazd Synoptic Station. *Management of Natural Ecosystems*, 6(2), 26-36.

Abstract

Solar radiation is an important variables in models of energy balance, evapotranspiration, and plant growth simulation. In this research, evaluated the performance of 41 empirical models (10, 7, and 24 models based on solar radiation data, temperature, and other meteorological data, respectively) for estimating daily solar radiation at the Yazd synoptic station from 2006 to 2023 was investigated and fixed coefficients of equations were calculated using regression analysis in SPSS software. Data from 2006 to 2020 were used for calibration, and data from 2021 to 2023 were used for model validation. Common evaluation criteria such as Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and the coefficient of determination (R^2) were used. The results showed that an empirical model that estimates solar radiation based on meteorological data of average temperature, extraterrestrial radiation, sunshine hours, and maximum sunshine hours showed better results than other models; So that Model No. 34 (Togrul and Onat, 1999), with a coefficient of determination of 0.75, a root mean square error of 1.892, and a mean absolute error of 1.263, achieved the best performance compared to the other empirical models, and models that predict solar radiation based on only the temperature parameter achieved a lower evaluation result than other models. Overall, it can be concluded that multivariable models (hybrid) provide superior performance in estimating solar radiation from meteorological, hydrological, and atmospheric physics viewpoint, because solar radiation reaching the Earth's surface is governed by the simultaneous interaction of multiple atmospheric processes, and a single variable cannot adequately describe all of these processes. On the other hand, although hybrid and machine learning methods often outperform empirical models in terms of accuracy, empirical formulas still achieve satisfactory performance in many cases due to their simplicity.

Key Words:

Solar radiation estimation, regression methods, Effective meteorological parameters, predictive model performance.