توسعه و ارزیابی مدل‌های تخمین تابش خورشیدی بر اساس ساعات آفتابی و اطلاعات هواشناسی

ابوالفضل مجنونی هریس[۱]، شاهرخ زند پارسا[۲*]، علیرضا سپاسخواه[۲] و محمد جعفر ناظم السادات[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۲/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۶/۷/۴)

چکیده

تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین (R_s) در بسیاری از زمینه‌ها از داده‌های اساسی می‌باشد. مهندسین انرژی، معماری، کشاورزی و هیدرولوژی در کارهای خود از R_s به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌کنند. به‌دلیل اهمیت R_s، مدل‌های مختلفی برای تخمین آن ارائه شده است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده روزانه R_s در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ در منطقه باجگاه در استان فارس، ضرایب مدل آنگستروم بر اساس نسبت ساعات آفتابی واقعی روزانه (n) به حداکثر ساعات آفتابی ممکن (N) واسنجی گردید. این مدل با اعمال دمای هوا به‌صورت‌های مختلف اصلاح شد تا علاوه بر نسبت n/N، اثر زمان وقوع ابری بودن نیز به‌صورت غیر مستقیم جهت تخمین R_s به‌کار گرفته شود. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اضافه کردن دمای هوا در معادله آنگستروم باعث بالا رفتن دقت تخمین R_s گردید. بررسی‌ها نشان داد که اضافه شدن متوسط روزانه دمای هوا نسبت به وارد نمودن جذر اختلاف حداکثر و حداقل دمای هوا، تأثیر بیشتری بر دقت تخمین R_s داشت. هم‌چنین یک مدل منطقه‌ای دقیق با در نظر گرفتن عوامل مختلف هواشناسی شامل اطلاعات روزانه مقدار کمبود فشار بخار اشباع، درصد رطوبت نسبی، بارندگی، دمای متوسط هوا، اختلاف بین مقادیر حداکثر و حداقل دمای روزانه و نسبت n/N ارائه شد. این مدل دارای بهترین تخمین در بین مدل‌های مورد بحث بود. در بخش دیگر این پژوهش تعدادی از مدل‌های تخمین R_s، که قبلاً توسط پژوهشگران دیگر ارائه شده بودند، برای منطقه مورد مطالعه واسنجی شدند. در نهایت با استفاده از داده‌های مستقل اندازه‌گیری شده تابش در سال ۱۳۸۴ تمام مدل‌ها اعتبارسنجی شدند. نتایج سنجش اعتبار مدل‌ها نشان داد که مدل منطقه‌ای دقیق که دارای نسبت n/N و سایر اطلاعات هواشناسی است، دارای دقت تخمین بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. در نتیجه معادلاتی که دارای عوامل دما و نسبت n/N هستند، در مقایسه با مدل‌های فاقد این نسبت، از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تابش خورشیدی، تابش خارج از جو، ساعات آفتابی واقعی، ضرایب آنگستروم

۱. مربی مرکز پژوهش‌های جوی- اقیانوسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. به ترتیب استادیار، استاد و دانشیار مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.37.6]

مقدمه

تخمین تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین (R_s, M J m^{-2} d^{-1}) کاربردهای زیادی در علوم معماری، مهندسی انرژی، کشاورزی و هیدرولوژی دارد. برآورد درست مقدار R_s از اصول اولیه و مهم طراحی شبکه‌ها و برنامه‌ریزی آبیاری است. تابش خورشیدی عاملی بسیار مهم در معادلات برآورد تبخیر- تعرق گیاه می‌باشد و تخمین مناسب آن در توسعه مدل‌های شبیه سازی رشد گیاهان اهمیت زیادی دارد (۳، ۱۴ و ۱۸). عدم اندازه‌گیری R_s در جاهای مختلف به‌دلیل هزینه‌های خرید و نگه‌داری تجهیزات لازم، موجب شده است که پژوهشگران مدل‌های مختلفی برای تخمین مقدار آن ارائه نمایند (۶، ۸، ۲۰ و ۲۱).

آنگستروم در سال ۱۹۲۴ مدل جهانی تخمین R_s را به‌صورت زیر ارائه نمود:

$$R_s = R_a(a + b\frac{n}{N}) \qquad [۱]$$

که در آن R_a تابش خارج از جو(M J m^{-2} d^{-1})، N و n به‌ترتیب ساعات آفتابی ممکن و واقعی در دوره زمانی مورد بررسی و a و b ضرایب ثابت معادله می‌باشند. مدل آنگستروم و مدل‌های اصلاح شده آن که تابعی از ساعات آفتابی می‌باشند در بین مدل‌های ارائه شده، بیشترین کاربرد را دارند. درون بوس و پرویت (۷) ضرایب a و b را برای نیم‌کره شمالی به‌ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۰/۵۰ تعیین نمودند. مالک (۱۲) برای منطقه باجگاه فارس، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده R_s در سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۵۲، این ضرایب را به‌ترتیب برابر ۰/۳۱ و ۰/۵۵ واسنجی نمود. کاشفی‌پور و سپاسخواه (۱) این ضرایب را برای منطقه ملاثانی اهواز به‌ترتیب برابر ۰/۲۲ و ۰/۴۱ تعیین نمودند. ریتولد (۱۹) مقادیر ثابت معادله آنگستروم را وابسته به نسبت $\frac{n}{N}$ در نظر گرفت و معادله ۱ را به‌صورت زیر ارائه نمود:

$$R_s = R_a[(a' + b'\frac{n}{N}) + (a'' + b''\frac{n}{N})\frac{n}{N}] \qquad [۲]$$

که در آنها a'، a''، b' و b'' ضرایب ثابت معادله می‌باشند.

هارگریوز و سامانی (۱۱) مدلی را ارائه دادند که در مواقع در دسترس نبودن ساعات آفتابی واقعی، بر اساس تابش خارج از جو (R_a) و اختلاف حداقل و حداکثر دمای هوا مقادیر R_s را با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌کرد:

$$R_s = K \times R_a \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \qquad [۳]$$

که در آن T_{max} و T_{min} به‌ترتیب حداکثر و حداقل دمای روزانه (^{0}C) و K ضریب ثابت معادله می‌باشد.هارگریوز و همکاران (۱۹۸۵) مدل ساده‌ای جهت تخمین R_s در شرایط نبودن داده‌های اندازه‌گیری شده ساعات آفتابی ارائه نمودند. این مدل نیز مقدار R_s را با استفاده از مقادیر R_a و جذر اختلاف T_{max} و T_{min} از رابطه زیر محاسبه می‌کند:

$$R_s = R_a[c(T_{max} - T_{min})^{0.5} + d] \qquad [۴]$$

که در آن c و d ضرایب ثابت معادله می‌باشند.

آلن و همکاران (۲) یک معادله تجربی ساده جهت تخمین R_s در روزهای بدون ابر به‌صورت زیر پیشنهاد کردند:.

$$R_s = eR_a - f \qquad [۵]$$

که در آن e و f ضرایب ثابت معادله می‌باشند این معادله در روزهای غیر ابری، مقادیر R_s را تنها با استفاده از مقادیر R_a تخمین می‌زند.

پژوهشگران مختلفی تلاش کرده‌اند تا برای تخمین مقادیر R_s علاوه بر ساعات آفتابی، دمای هوا و تابش خارج از جو، از داده‌های هواشناسی دیگری نیز استفاده کنند تا علاوه بر وضعیت ابری بودن آسمان، شرایط جوی زمین را نیز جهت دریافت انرژی خورشیدی مدنظر قرار دهند (۹، ۱۳، ۱۶ و ۱۷). بررسی این معادلات نشان داد که استفاده از نسبت $\frac{n}{N}$ در مدل، باعث افزایش دقت در تخمین R_s می‌شود.

چن و همکاران(۵)، مدل‌های مختلفی را با استفاده از داده‌های هواشناسی برای مناطق مختلف چین ارائه کردند و نشان دادند که مدل‌هایی که غیر از نسبت $\frac{n}{N}$ دارای سایر داده‌های هواشناسی هستند، از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند. منگز و همکاران (۱۳) با مطالعه روی مدل‌های تابش در قونیه ترکیه به این نتیجه رسیدند که مدل نه متغیره ارائه شده توسط

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.37.6]

ارتکین و یلدز (۹) نسبت به بقیه مدل‌ها دقت بالاتری داشت.

اهداف این تحقیق شامل: الف) اصلاح مدل آنگستروم (۴) با منظور کردن غیر مستقیم اثر زمان وقوع ابری بودن بر اساس دمای هوا، ب) بررسی اثر دمای هوا، رطوبت نسبی، کمبود فشار بخار و بارندگی روزانه در تخمین مقدار R_s با ارائه یک مدل منطقه‌ای و ج) واسنجی و سنجش اعتبار مدل‌های مورد بررسی در ایستگاه هواشناسی واقع در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.

مواد و روش‌ها

داده‌های اندازه‌گیری شده R_s، n، و سایر اطلاعات هواشناسی شامل متوسط، حداقل و حداکثر دمای هوای روزانه، متوسط درصد رطوبت نسبی و بارش روزانه، برای سال‌های ۱۳۸۲ الی ۱۳۸۴ از ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز تهیه گردید. طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح آب‌های آزاد ایستگاه به‌ترتیب برابر '۳۴ °۵۲ شرقی،'۴۵ °۲۹ شمالی و ۱۸۱۰ متر می‌باشد. در این پژوهش از داده‌های اندازه‌گیری شده در طول سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ برای واسنجی و از داده‌های سال ۱۳۸۴ جهت سنجش اعتبار مدل‌ها استفاده شد. تابش رسیده به سطح زمین (R_s) با استفاده از تابش سنج pyranometer (solarimeter) sensor-ELE) (507-250 و ساعات آفتابی واقعی(n) با دستگاه آفتاب‌نگار (Campbell- Stokes) اندازه‌گیری شدند.

برای تعیین عوامل ثابت معادلات از روش حداقل نمودن مجموع مربع خطاها بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده R_s، استفاده شد. برای بررسی دقت تخمین روابط واسنجی شده از معادله ناش و ساتکلیف (۱۵)(Nash and Sutcliffe) (NSE)، جذر میانگین مجموع مربع خطاها (Root Mean Square Error) (RMSE, MJ $m^{-2}d^{-1}$) و متوسط خطای سؤگیری (Mean Bias Error) (MBE, MJ $m^{-2}d^{-1}$) به‌صورت زیر استفاده گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{U}\sum_{i=1}^{U}(P_i - O_i)^2} \quad [۶]$$

$$MBE = \frac{\sum_{1}^{U}(P_i - O_i)}{U} \quad [۷]$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{U}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{U}(O_i - \overline{O})^2} \quad [۸]$$

که در روابط فوق P_i، O_i، $\overline{O}$ و U به‌ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده در زمان i، اندازه‌گیری شده در زمان i، میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و تعداد داده‌ها هستند. در معادله ۸ مقدار NSE بین صفر تا یک تغییر می‌کند. هر چه مقدار NSE به یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده تطابق بهتر مقادیر تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. در مطالعات زیادی از معادلات ۶ تا ۸ جهت انتخاب مناسب‌ترین مدل استفاده می‌گردد (۱۳). علامت جبری مقدار MBE نشان دهنده مثبت یا منفی بودن مقدار خطا می‌باشد. اگر مقدار MBE مثبت یا منفی باشد نشان دهنده این است که مقادیر تخمین زده شده به‌ترتیب بیشتر یا کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده هستند. مقدار RMSE نشان دهنده متوسط مربع خطا بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده است. در واقع برای تخمین ضرایب هر معادله سعی گردید تا مجموع مربع خطاها به حداقل رسانیده شود و مقدار RMSE نشان دهنده اثر هر مدل در به حداقل رسانیدن این خطاها می‌باشد. هر چه مقدار RMSE کمتر باشد نشان دهنده مناسب‌تر بودن دقت تخمین مدل است.

نتایج و بحث

همان‌طوری که قبلاً گفته شد، به‌دلیل هزینه خرید و نگه‌داری تجهیزات لازم در بسیاری از مناطق، اندازه‌گیری R_s صورت نمی‌گیرد. مدل‌های زیادی بر اساس عوامل مختلف هواشناسی برای تخمین آن ارائه شده است. تعدادی از این مدل‌ها بر اساس عوامل کمتری مقادیر R_s را تخمین می‌زنند و تعدادی دیگر از عوامل مختلف هواشناسی استفاده می‌کنند. هر کدام از این

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.37.6]

مدل‌ها بسته به منطقه‌ای که به‌کار می‌روند از اهمیت خاصی برخوردار هستند. در معادله آنگستروم، نسبت n/N به‌عنوان تنها عامل مؤثر در تابش در نظر گرفته شده است. ریتولد (۱۹) نیز جهت تخمین تابش از نسبت n/N استفاده نمود و ضرایب معادله آنگستروم را اصلاح کرد. هم‌چنین موقع ابری بودن آسمان بر مقدار R_s مؤثر است. ابری بودن آسمان بسته به این‌که در چه موقعی از روز اتفاق بیفتد بر مقدار R_s تأثیر دارد. ابری بودن آسمان، در ابتدا و انتهای روز از مقدار ساعات آفتابی واقعی می‌کاهد اما ممکن است تأثیر آن بر R_s به اندازه ابری بودن آسمان در مواقع ساعات گرم روز نباشد. در شکل ۱ مقادیر R_s در یک روز زمستانی و تابستانی در طول ساعات مختلف شبانه روز نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود مقادیر R_s در اواسط یک روز آفتابی به حداکثر خود می‌رسد.

تابش رسیده به سطح زمین بر دمای هوای زمین نیز مؤثر است. در شکل ۲ مقدار تغییر دمای ایستگاه مورد مطالعه در ساعات مختلف یک روز تابستانی و یک روز زمستانی نشان داده شده است.

در بین مدل‌های ارائه شده، مدل آنگستروم و هارگریوز به‌عنوان دو مدل پایه جهت تخمین مقادیرR_s مطرح هستند و مدل آنگستروم و مدل‌های وابسته به آن با توجه به عملکرد مناسبشان بیشترین کاربرد را پیدا کرده‌اند. ایستگاه مورد مطالعه در این پژوهش با متوسط ساعات آفتابی سالیانه ۳۱۵۰ ساعت در سال در یک منطقه آفتابی در جنوب ایران واقع شده است و متوسط شدت تابش خورشید برابر $۷۵۹/۴۵\ W\ m^{-2}$ می‌باشد.

الف) اصلاح مدل آنگستروم با منظور کردن غیر مستقیم اثر زمان ابری بودن آسمان با استفاده از دما

یکی از مدل‌های پر کاربرد که دقت مناسبی در تخمین R_s دارد، مدل آنگستروم (۴) می‌باشد. این مدل بر اساس نسبت n/N و مقادیر R_a، مقادیر R_s را تخمین می زند. ابتدا مقادیر R_s با استفاده از معادله آنگستروم و با در نظر گرفتن ضرایب پیشنهادی دورنباس و پرویت (۷) , (a =۰/۲۵ و b= ۰/۵) در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز تخمین زده شد. مقادیر آماری RMSE، MBE و NSE به‌ترتیب برابر $۵/۱۶\ MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$، $-۴/۴۳\ MJ\ m^{-2}d^{-1}$ و ۰/۵۴ محاسبه شدند. عوامل آماری به‌دست آمده نشان می‌دهد که ضرایب ارائه شده برای نیم‌کره شمالی در منطقه مورد مطالعه در این پژوهش دارای دقت مناسب نمی‌باشند و این معادله نیاز به واسنجی و اصلاح دارد.

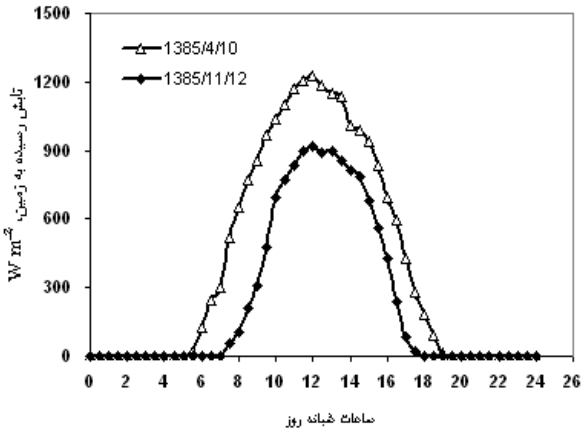
این معادله برای منطقه مورد مطالعه واسنجی شد و مقادیر a و b در معادله ۱ به‌ترتیب برابر ۰/۳۱ و ۰/۶۰ به‌دست آمد. مقادیر RMSE، MBE و NSE در مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده R_s معادله به‌ترتیب برابر ۲/۵۵، -۰/۱۲ و ۰/۸۹ به‌دست آمدند. مالک (۱۲) برای منطقه باجگاه ضرایب a و b در معادله ۱ را به‌ترتیب برابر ۰/۳۱ و ۰/۵۵ تخمین زد. با داده‌های اندازه‌گیری شده در این پژوهش مدل آنگستروم با اعمال ضرایب مالک (۱۲) نیز برای منطقه اعتبار سنجی شد. مقادیر RMSE، MBE و NSE به‌ترتیب برابر ۲/۸۳، -۱/۲۶ و ۰/۸۶ حاصل شدند.

معادله ریتولد (۱۹) برای منطقه باجگاه واسنجی شد و مقادیر a'، b'، a'' و b'' به‌ترتیب برابر ۰/۲۶، ۰/۴۳، ۰/۴۳ و -۰/۲۵ تعیین گردید. مقادیر آماری RMSE، MBE و NSE در مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده R_s نیز به‌ترتیب برابر ۲/۵۰، -۰/۱۳ و ۰/۸۹ حاصل شدند. با توجه به این‌که، زمان وقوع ابری بودن آسمان بر R_s مؤثر است، لذا جهت اعمال اثر آن، دمای هوای روزانه وارد معادله فوق گردید تا به‌صورت غیر مستقیم، اثر موقع ابری بودن آسمان را نشان دهد. لذا جذر اختلاف T_{max} و T_{min} به معادله ۲ اضافه و به‌صورت زیر واسنجی شدند:

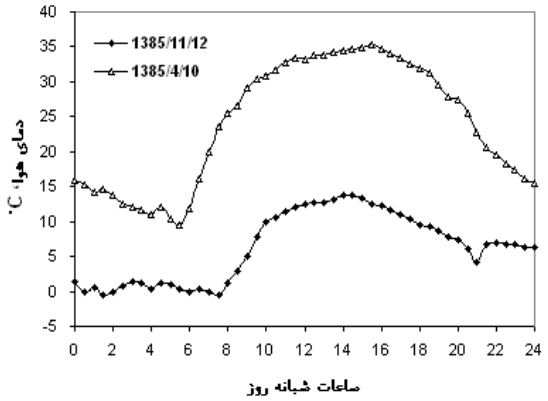
$$R_s = R_a\left[\left(-0/14+0/136\sqrt{T_{max}-T_{min}}+0/60\frac{n}{N}\right)+\left(0/54-0/194\sqrt{T_{max}-T_{min}}+0/152\frac{n}{N}\right)\frac{n}{N}\right] \quad [۹]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.37.6]



شکل ۱. مقادیر تابش رسیده به سطح زمین(R_s) در طول یک روز صاف تابستانی و زمستانی



شکل ۲. مقادیر دمای هوا در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در طول یک روز صاف تابستانی و زمستانی

RMSE= ۲/۳۸MBE , = -۰/۱۰ NSE & =۰/۹۰

موقع ابری بودن آسمان، اثر بیشتری بر کاهش R_s روزانه و در نتیجه بر میانگین دمای روزانه (T_{mean}, °C) دارد. با اعمال اثر میانگین دمای روزانه در معادله (۲)، معادله زیر حاصل شد:

$$R_s = R_a[(0/167 + 0/009T_{mean} + 0/150\frac{n}{N}) + (0/842 - 0/017T_{mean} - 0/118\frac{n}{N})\frac{n}{N}] \quad [۱۰]$$

RMSE= ۲/۲۰MBE , = -۰/۰۱ NSE & =۰/۹۲

عوامل آماری این معادله نشان می‌دهد که نسبت به معادله‌های قبل تخمین بهتری حاصل شده است.

با جایگزین شدن مقادیر a′، b′، a″ و b″ در معادلات فوق رابطه بین R_s و n/N به‌صورت غیر خطی می‌شود. اگر ضرایب معادله ۱ در مقیاس روزانه به‌صورت زیر در نظر گرفته شوند:

$$R_s = R_a[(-0/08 + 0/11\sqrt{T_{max} - T_{min}}) + (1/17 - 0/16\sqrt{T_{max} - T_{min}})\frac{n}{N}] \quad [۱۱]$$

RMSE= ۲/۴۰MBE , = -۰/۱۴ NSE & =۰/۸۹

$$R_s = R_a[(0/167 + 0/010T_{mean}) + (0/893 - 0/019T_{mean})\frac{n}{N}] \quad [۱۲]$$

RMSE= ۲/۲۲MBE , = ۰/۰۱ NSE & =۰/۹۲

رابطه بین R_s و نسبت n/N به‌صورت خطی خواهد بود. از نتایج به‌دست آمده تا به اینجا می‌توان دریافت که میانگین دمای روزانه نسبت به جذر اختلاف دمای حداکثر و حداقل روزانه اثر بهتری در تخمین تابش خورشیدی دارد. میانگین دمای روزانه به شکل زیر نیز به معادله آنگستروم اضافه و ضرایب آن تعیین شد:

$$R_s = R_a(0/36 - 0/004T_{mean} + 0/627\frac{n}{N}) \quad [۱۳]$$

RMSE= ۲/۳۹, MBE = ۰/۰۳ NSE & =۰/۹۰

عوامل آماری حاصل شده نشان می‌دهد که دقت این معادله در مقایسه با معادله ۱۲ کمتر است. با وارد کردن میانگین دمای روزانه، جذر اختلاف دمای حداکثر و حداقل هوا، معادله آنگستروم به شکل زیر واسنجی گردید:

$$R_s = R_a(0/254 - 0/005T_{mean} + 0/036\sqrt{T_{max} - T_{min}} + 0.569\frac{n}{N})$$

RMSE= ۲/۳۳MBE , = ۰/۰۲ NSE & =۰/۹۱

[۱۴]

عوامل آماری مورد بررسی برای این معادله نیز نشان می‌دهند که این معادله دارای دقت بالاتری نسبت به معادله ۱۳ می‌باشد.

ب) مدل منطقه‌ای چند متغیره

تابش رسیده به سطح زمین علاوه بر ساعات آفتابی به عوامل

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.37.6]

هواشناسی دیگری نیز وابسته می‌باشد. مدل‌های زیادی نیز جهت تخمین R_s بر اساس اطلاعات هواشناسی ارائه گردیده‌اند که پیش‌تر به موارد متعددی از آنها اشاره گردید. در این بخش از مطالعه یک مدل منطقه‌ای جدید بر اساس داده‌های هواشناسی معمول ارائه می‌شود تا در مواقعی که تابش خورشیدی اندازه‌گیری نشده است، با استفاده از آن R_s با دقت مناسبی برآورد گردد. با استفاده از نتایج حاصله از معادلات ۹ تا ۱۴ و تحقیقات (۵، ۹و ۱۳) عوامل مهم هواشناسی مؤثر بر مقدار R_s، عوامل T_{mean}، T_{max}، T_{min}، D، P، RH% و n/N می‌باشد که با سعی و خطا و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده R_s و اطلاعات هواشناسی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، مدلی بر پایه اطلاعات هواشناسی به‌صورت زیر ارائه گردید:

$$R_S = R_a[-0/5562D^2 - 0/0786D + 0/0003T_{mean}^2 - 0/0137T_{mean} - 0/0003(T_{max} - T_{min})^2 + 0/0129(T_{max} - T_{min}) - 0/0035P - 0/0024RH + 0/5161(\frac{n}{N}) + 0/5095] \quad [۱۵]$$

RMSE= ۱/۹۳MBE , = ۰/۰۲ NSE & = ۰/۹۴

که در این رابطه D، RH وP به‌ترتیب کمبود فشار بخار اشباع (mbar)، درصد رطوبت نسبی و بارش روزانه (mm) می‌باشند. در شکل ۳ مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده R_s با معادله فوق نشان داده شده است. عوامل آماری RMSE، MBE و NSE نشان می‌دهند که این معادله نسبت به معادلات دیگر دقت بالاتری دارد. با توجه به در دسترس بودن عوامل هواشناسی، کاربرد این معادله جهت تخمین R_s به‌خصوص در ایامی که مقدار آن اندازه‌گیری نمی‌شود، برای ایستگاه مورد مطالعه توصیه می‌گردد.

ج) واسنجی سایر مدل‌های تخمین تابش خورشیدی موجود

مدل‌های ساده ارائه شده توسط آنگستروم (۴)،هارگریوز و سامانی (۱۱)،هارگریوز و همکاران (۱۰) و آلن و همکاران (۲) به‌عنوان مدل‌های پایه مورد استفاده پژوهشگران مختلف می‌باشد. در مورد مدل آنگستروم قبلاً بحث شد. در این بخش به واسنجی سه مدل پایه باقی‌مانده پرداخته می‌شود. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده R_s در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳، ضریب K در معادله (۳) در این ایستگاه برابر ۰/۱۷۱۵ $^0C^{-0/5}$ به‌دست آمد. آلن و همکاران (۲) در نشریه فائو ۵۶ مقدار ضریب ثابت این معادله را در محدوده ۰/۱۶ $^0C^{-0/5}$ تا ۰/۱۹ $^0C^{-0/5}$ گزارش کردند. مقادیر عوامل آماری RMSE، MBE و NSE در معادله ۳ به‌ترتیب برابر ۴/۰۱، ۰/۲۵- و ۰/۷۲ محاسبه شدند.

ضرایب c و d معادله ۴ برای منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب برابر ۰/۱۵۵ $^0C^{-0/5}$ و ۰/۰۷۳ به‌دست آمدند و عوامل آماری RMSE، MBE و NSE این معادله نیز به‌ترتیب برابر ۴/۰، ۰/۱۹- و ۰/۷۳ محاسبه شدند. بررسی عوامل آماری نشان می‌دهد که مدل‌های بدون ساعات آفتابی مانند مدل‌های (۳) و (۴) در مقایسه با مدل‌هایی که دارای نسبت ساعات آفتابی هستند تخمین رضایت بخشی ندارند.

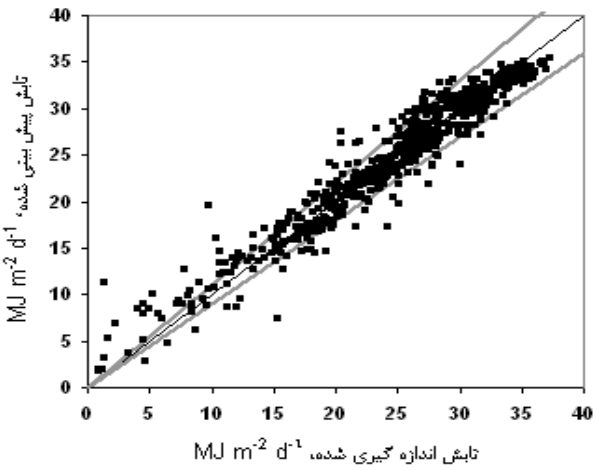
همان‌طوری که قبلاً ذکر شد آلن و همکاران (۲) مدل (۵) را ارائه کردند که تنها با استفاده از معادله R_a در روزهای آفتابی و بدون ابر مقادیر R_s را تخمین می‌زند. از این معادله زمانی که هیچ پارامتر هواشناسی اندازه‌گیری شده وجود نداشته باشد استفاده می‌گردد. در شکل ۴ رابطه بین مقدار R_s و R_a در روزهای بدون ابر در سال‌های ۱۳۸۲و ۱۳۸۳ نشان داده شده است. مقادیر ضرایب واسنجی شده و عوامل آماری معادله ۵ در روی شکل فوق آورده شده است. دقت بالای این معادله با وجود تخمین R_s بر اساس R_a، به‌دلیل نوسان کم نسبت $\frac{R_s}{R_a}$ در روزهای بدون ابر می‌باشد. بدیهی است که در روزهای بدون ابر و صاف مقادیر R_a به‌عنوان عامل مهم تخمین R_s خواهد بود.

د) اعتبار سنجی مدل‌های مورد بررسی

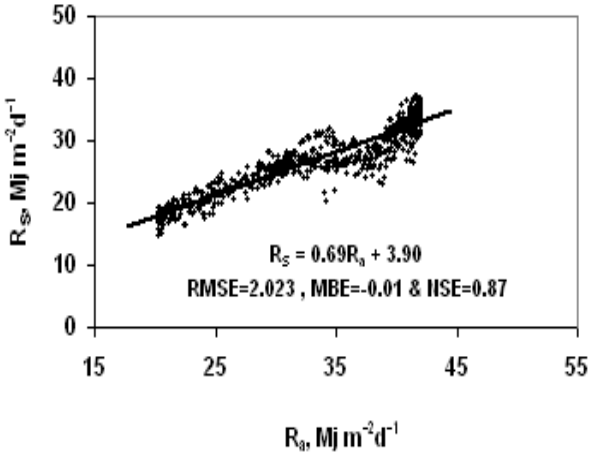
عملکرد مدل‌های توسعه یافته و واسنجی شده برای منطقه‌ای خاص بایستی با استفاده از داده‌های مستقل اندازه‌گیری شده اعتبار سنجی گردد. برای سنجش اعتبار این مدل‌ها از داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۸۴ استفاده شد. نتایج مربوط به اعتبار سنجی این مدل‌ها به‌طور خلاصه در جدول ۱

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.37.6]



شکل ۳. رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده تابش خورشیدی (Rs) توسط معادله (۱۵) در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳



شکل ۴. رابطه بین مقدار تابش رسیده به سطح زمین (Rs) و تابش خارج از جو (Ra) در ایستگاه هواشناسی واقع در دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز در روزهای بدون ابر سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳

جدول ۱. عوامل آماری (NSE، MBE و RMSE) برای اعتبار سنجی مدل‌های مورد بررسی در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز با استفاده از داده‌های سال ۱۳۸۴

شماره مدل	عوامل آماری		
	RMSE	MBE	NSE
۱	۲/۶۰	۰/۳۹	۰/۸۹
۲	۲/۵۵	-۰/۱۹	۰/۸۹
۳	۳/۸۲	۰/۲۰	۰/۷۶
۴	۳/۷۷	-۰/۲۲	۰/۷۶
۵	۲/۲۳	۰/۲۸	۰/۸۵
۹	۲/۴۹	-۰/۱۰	۰/۹۰
۱۰	۲/۳۴	-۰/۲۸	۰/۹۱
۱۱	۲/۴۸	۰/۳۲	۰/۹۰
۱۲	۲/۳۵	۰/۳۲	۰/۹۱
۱۳	۲/۳۸	-۰/۴۸	۰/۹۱
۱۴	۲/۲۸	-۰/۲۱	۰/۹۱
۱۵	۲/۲۵	۰/۰۳۴	۰/۹۲

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.37.6]

آورده شده است. نتایج اعتبار سنجی مدل‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که مدل شماره ۱۵ که دارای نسبت n/N و سایر اطلاعات هواشناسی است، با مقایسه عوامل آماری NSE، MBE و RMSE با دیگر مدل‌ها، دارای دقت تخمین بالاتری می‌باشد. نتیجتاً مدل‌هایی که دارای عوامل دما و نسبت n/N هستند (مدل‌های ۹ تا ۱۴)، در مقایسه با مدل‌های فاقد نسبت n/N از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تعدادی معادلات پایه برای تخمین R_s (معادلات ۱ تا ۵) برای منطقه مورد مطالعه واسنجی و اعتبارسنجی شد. اثر دمای هوا در معادله آنگستروم اعمال شد و این معادله به‌صورت‌های مختلف با استفاده از متوسط دمای هوای روزانه، جذر اختلاف حداکثر و حداقل دمای هوای روزانه اصلاح شد. نتایج حاصله نشان داد که استفاده از دمای هوا و نسبت n/N دقت تخمین R_s را بالا می‌برد. معادلاتی که در آنها از داده‌های T_{mean} و n/N جهت تخمین R_s استفاده شده بود، نسبت به معادلاتی که در آنها جذر اختلاف T_{max} با T_{min} و n/N به‌کار رفته بود دقت بالاتری دارند. این مسأله به‌دلیل هم‌آهنگی بیشتر تغییرات دمای متوسط هوا با تابش رسیده به سطح زمین می‌باشد. موقع ابری بودن آسمان، بر متوسط دمای هوا در طول روز مؤثر است. طبیعی است که نوسان متوسط دمای هوای روزانه می تواند از مدت و موقع ابری بودن آسمان تأثیر بیشتری بپذیرد. در این مطالعه یک مدل منطقه‌ای جدید (معادله ۱۵) بر اساس اطلاعات هواشناسی مختلف ارائه شد که نسبت به بقیه مدل‌ها دقت بالاتری در تخمین R_s داشت. بررسی نتایج این مطالعه نشان داد، مدل‌هایی که از نسبتn/N ، برای تخمین R_s استفاده نمی‌کنند دقت تخمین پایینی دارند.

منابع مورد استفاده

۱. کاشفی پور، س. م. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۷۶. مجله علمی کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز ۲۰: ۱۷-۲۶.

2. Allen, R. G., L. S. Pereria, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper. No. 56. 301p.
3. Almorox, J. and C. Hontoria. 2004. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. Energy Convers. Manag. 45:1529–1535.
4. Angstrom, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. Quart. J. Roy. Met. Soc. 50:121–125.
5. Chen, R., E. Kang, S. Lu, J.Y. Xibin Ji, Z. Zhang and J. Zhang. 2006. New methods to estimate global radiation based on meteorological data in China. Energy Convers. and Manag. 47:2991–2998.
6. Chen, R., K. Ersi, J. Yang, S. Lu and W. Zhao. 2004. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. Energy Convers. Manag. 45:1759–1769.
7. Doorenbus, J. and W.O. Pruitt. 1984. Crop Water Requirements. FAO Irrig. and Drain. paper. No. 24. 144 P.
8. El-Metwally, M. 2005. Sunshine and global solar radiation estimation at different sites in Egypt. J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. 7:1331–1342.
9. Ertekin, C. and O. Yaldiz. 1998. Estimation of global solar radiation on horizontal surface (in Turkish). *In*: SunDay Symposium and Fair, 19–21June, Izmir, Turkey.
10. Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves and P. Riley. 1985. Irrigation water requirement for the Senegal River Basin. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 111:265–275.
11. Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Eng. 108: 225-230.
12. Malek, E. 1979. Determination of the constants for the global radiation equation at Badjgah, Iran Agrc. Meteorol. 20:233-235.
13. Menges, H.O., C. Ertekin and M. H. Sonmete. 2006. Evaluation of global solar radiation models for Konya, Turkey. Energy Convers. Manag. 47: 3149–3173.
14. Mossad, E. 2004. Simple new methods to estimate global solar radiation based on meteorological data in Egypt. Atmos. Res. 69:217–239.
15. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. J. Hydrol. 10:282–290.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.37.6]

16. Ododo, J.C., A.T. Sulaiman and J. Aidan.1995. The importance of maximum air temperature in the parameterization of solar radiation in Nigeria. Renew. Energy 6:751–763.
17. Ojosu, J.O. and L.K. Komolafe. 1987. Models for estimating solar radiation availability in South Western Nigeria. Nig. J. Solar Energy. 6:69–77.
18. Peter, E.T. and W.R. Steven. 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation. Agric. Forest Meteorol. 93:211–228.
19. Rietveld, M. 1978. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. Agric. Meteorol. 19:243–252.
20. Tadros, M.T.Y. 2000. Uses of sunshine duration to estimate the global solar radiation over eight meteorological stations in Egypt. Renew. Energy 21:231–246.
21. Tarhan, S. and A. Sari. 2005. Model selection for global and diffuse radiation over the Central Black Sea (CBS) region of Turkey. Energy Convers. Manag. 46:605–614.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.37.6]