

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

ابوالفضل مجنونی هریس<sup>۱</sup>، شاهرخ زند پارسا<sup>۲\*</sup>، علیرضا سپاسخواه<sup>۲</sup> و محمد جعفر ناظم السادات<sup>۲</sup>

(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. مهندسين انرژی، معماری، کشاورزی و هیدرولوژی در کارهای خود از  $R_s$  به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌کنند. به دلیل 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 ( $N$ ) و اسنجی گردید. این مدل با اعمال دمای هوا به صورت‌های مختلف اصلاح شد تا علاوه بر نسبت  $n/N$ ، اثر زمان وقوع ابری بودن نیز به صورت غیر مستقیم جهت تخمین  $R_s$  به کار گرفته شود. نتایج به دست 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 و اسنجی 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](mailto:zandparsa@yahoo.com)

مقدمه

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:

$$R_s = K \times R_a \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} \quad [3]$$

که در آن  $T_{\max}$  و  $T_{\min}$  به ترتیب حداکثر و حداقل دمای روزانه ( $^{\circ}\text{C}$ ) 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:

$$R_s = R_a [c(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + d] \quad [4]$$

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 به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$R_s = eR_a - f \quad [5]$$

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

تخمین تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین ( $R_s$ ,  $\text{M J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) 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 به دلیل 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 به صورت زیر ارائه نمود:

$$R_s = R_a (a + b \frac{n}{N}) \quad [1]$$

که در آن  $R_a$  تابش خارج از جو ( $\text{M J m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )،  $N$  و  $n$  به ترتیب 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 به ترتیب 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 به ترتیب برابر ۰/۳۱ و ۰/۵۵ و اسنجی نمود. کاشفی‌پور و سپاسخواه (۱) این ضرایب را برای منطقه ملاثانی اهواز به ترتیب 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 به صورت زیر ارائه نمود:

$$R_s = R_a [(a' + b' \frac{n}{N}) + (a'' + b'' \frac{n}{N}) \frac{n}{N}] \quad [2]$$

که در آنها  $a'$ ،  $a''$ ،  $b'$  و  $b''$  ضرایب ثابت معادله می‌باشند. هارگریوز و سامانی (۱۱) مدلی را ارائه دادند که در مواقع

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{U} \sum_{i=1}^U (P_i - O_i)^2} \quad [6]$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^U (P_i - O_i)}{U} \quad [7]$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^U (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^U (O_i - \bar{O})^2} \quad [8]$$

که در روابط فوق  $P_i$ ,  $O_i$ ,  $\bar{O}$  و  $U$  به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده در زمان  $t$ ، اندازه‌گیری شده در زمان  $t$ ، 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 به ترتیب 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، به دلیل 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 این عوامل مختلف هواشناسی استفاده می‌کنند. هر کدام از این

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 به ترتیب برابر  $34^{\circ} 52'$  شرقی،  $45^{\circ} 29'$  شمالی و  $1810$  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 سوگیری ( $MBE, MJ m^{-2}d^{-1}$ ) (Mean Bias Error) به صورت زیر استفاده گردید:

پیشنهادی دورنیاس و پرویت (۷) ،  $a = 0/25$  و  $b = 0/5$  در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز تخمین زده شد. مقادیر آماری RMSE، MBE و NSE به ترتیب برابر  $5/16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ،  $4/43$  و  $0/54$  محاسبه شدند. عوامل آماری به دست آمده نشان می دهد که ضرایب ارائه شده برای نیم کره شمالی در منطقه مورد مطالعه در این پژوهش دارای دقت مناسب نمی باشند 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 به ترتیب برابر  $0/31$  و  $0/60$  به دست آمد. مقادیر RMSE، MBE و NSE در مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده  $R_s$  معادله به ترتیب برابر  $2/55$ ،  $0/12$  و  $0/89$  به دست آمدند. مالک (۱۲) برای منطقه باجگاه ضرایب  $a$  و  $b$  در معادله ۱ را به ترتیب برابر  $0/31$  و  $0/55$  تخمین زد. با داده های اندازه گیری شده در این پژوهش مدل آنگستروم با اعمال ضرایب مالک (۱۲) نیز برای منطقه اعتبار سنجی شد. مقادیر RMSE، MBE و NSE به ترتیب برابر  $2/83$ ،  $1/26$  و  $0/86$  حاصل شدند.

معادله ریتولد (۱۹) برای منطقه باجگاه واسنجی شد و مقادیر  $a'$ ،  $b'$ ،  $a''$  و  $b''$  به ترتیب برابر  $0/26$ ،  $0/43$ ،  $0/43$  و  $0/25$  تعیین گردید. مقادیر آماری RMSE، MBE و NSE در مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده  $R_s$  نیز به ترتیب برابر  $2/50$ ،  $0/13$  و  $0/89$  حاصل شدند. با توجه به این که، زمان وقوع ابری بودن آسمان بر  $R_s$  مؤثر است، لذا جهت اعمال اثر آن، دمای هوای روزانه وارد معادله فوق گردید تا به صورت غیر مستقیم، اثر موقع ابری بودن آسمان را نشان دهد. لذا جذر اختلاف  $T_{\max}$  و  $T_{\min}$  به معادله ۲ اضافه و به صورت زیر واسنجی شدند:

$$R_s = R_a \left[ (-0/14 + 0/136 \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} + 0/60 \frac{n}{N}) + (0/54 - 0/194 \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} + 0/152 \frac{n}{N}) \frac{n}{N} \right] \quad [9]$$

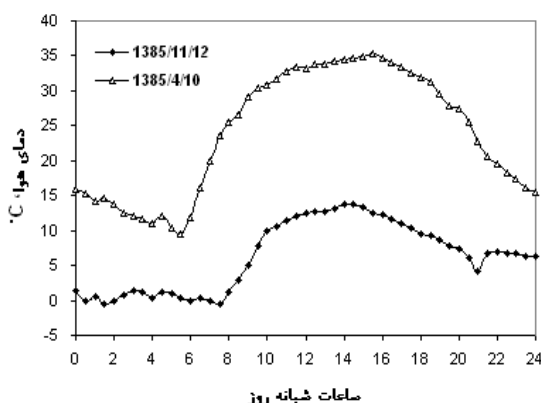
مدل ها بسته به منطقه ای که به کار می روند از اهمیت خاصی برخوردار هستند. در معادله آنگستروم، نسبت  $n/N$  به عنوان تنها عامل مؤثر در تابش در نظر گرفته شده است. ریتولد (۱۹) نیز جهت تخمین تابش از نسبت  $n/N$  استفاده نمود و ضرایب معادله آنگستروم را اصلاح کرد. هم چنین موقع ابری بودن آسمان بر مقدار  $R_s$  مؤثر است. ابری بودن آسمان بسته به این که 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 می کاهد اما ممکن است تأثیر آن بر  $R_s$  به اندازه ابری بودن آسمان در مواقع 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. همان طوری که مشاهده می شود مقادیر  $R_s$  در اواسط یک روز آفتابی به حداکثر خود می رسد.

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.

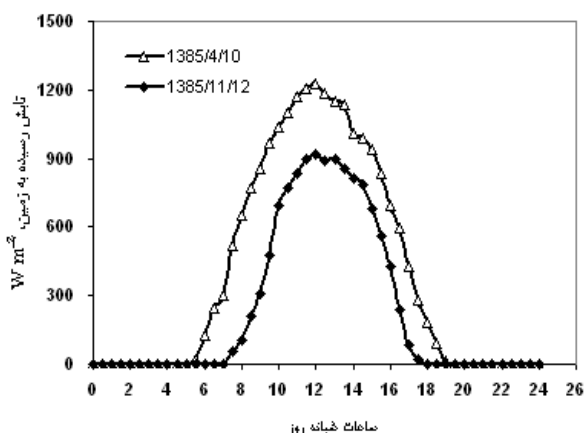
در بین مدل های ارائه شده، مدل آنگستروم و هارگریوز به عنوان دو مدل پایه جهت تخمین مقادیر  $R_s$  مطرح هستند و مدل آنگستروم و مدل های وابسته به آن با توجه به عملکرد مناسبشان بیشترین کاربرد را پیدا کرده اند. ایستگاه مورد مطالعه در این پژوهش با متوسط ساعات آفتابی سالیانه  $3150$  ساعت در سال در یک منطقه آفتابی در جنوب ایران واقع شده است و متوسط شدت تابش خورشید برابر  $759/45 \text{ W m}^{-2}$  می باشد.

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

یکی از مدل های پر کاربرد که دقت مناسبی در تخمین  $R_s$  دارد، مدل آنگستروم (۴) می باشد. 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



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



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

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:

$$R_s = R_a (0/36 - 0/004T_{mean} + 0/627 \frac{n}{N}) \quad [13]$$

$$RMSE = 2/39, \quad MBE = 0/03 \quad NSE \ \& \ = 0/90$$

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:

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

$$RMSE = 2/33 \quad MBE = 0/02 \quad NSE \ \& \ = 0/91$$

[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

$$RMSE = 2/38 \quad MBE = -0/10 \quad NSE \ \& \ = 0/90$$

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:

$$R_s = R_a [(0/167 + 0/009T_{mean} + 0/150 \frac{n}{N}) + (0/842 - 0/017T_{mean} - 0/118 \frac{n}{N}) \frac{n}{N}] \quad [10]$$

$$RMSE = 2/20 \quad MBE = -0/01 \quad NSE \ \& \ = 0/92$$

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  $n/N$  به صورت غیر خطی می‌شود. اگر ضرایب معادله ۱ در مقیاس روزانه به صورت زیر در نظر گرفته شوند:

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

$$RMSE = 2/40 \quad MBE = -0/14 \quad NSE \ \& \ = 0/89$$

$$R_s = R_a [(0/167 + 0/010T_{mean}) + (0/893 - 0/019T_{mean}) \frac{n}{N}] \quad [12]$$

$$RMSE = 2/22 \quad MBE = 0/01 \quad NSE \ \& \ = 0/92$$

رابطه بین  $R_s$  و نسبت  $n/N$  به صورت خطی خواهد بود. از نتایج به دست آمده تا به اینجا می‌توان دریافت که میانگین دمای

سه مدل پایه باقی مانده پرداخته می شود. با استفاده از داده های اندازه گیری شده  $R_s$  در سال های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳، ضریب  $K$  در معادله (۳) در این ایستگاه برابر  $0.1715 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0.5}$  به دست آمد. آلن و همکاران (۲) در نشریه فائو ۵۶ مقدار ضریب ثابت این معادله را در محدوده  $0.16 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0.5}$  تا  $0.19 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0.5}$  گزارش کردند. مقادیر عوامل آماری  $RMSE$ ،  $MBE$  و  $NSE$  در معادله ۳ به ترتیب برابر  $0.014$ ،  $0.025$  - و  $0.72$  محاسبه شدند.

ضرایب  $c$  و  $d$  معادله ۴ برای منطقه مورد مطالعه به ترتیب برابر  $0.155 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0.5}$  و  $0.073$  به دست آمدند و عوامل آماری  $RMSE$ ،  $MBE$  و  $NSE$  این معادله نیز به ترتیب برابر  $0.04$ ،  $0.19$  - و  $0.73$  محاسبه شدند. بررسی عوامل آماری نشان می دهد که مدل های بدون ساعات آفتابی مانند مدل های (۳) و (۴) در مقایسه با مدل هایی که دارای نسبت ساعات آفتابی هستند تخمین رضایت بخشی ندارند.

همان طوری 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 می زند. از این معادله زمانی که هیچ پارامتر هواشناسی اندازه گیری شده وجود نداشته باشد استفاده می گردد. در شکل ۴ رابطه بین مقدار  $R_a$  و  $R_s$  در روزهای بدون ابر در سال های ۱۳۸۲ و 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  $R_a$ ، به دلیل نوسان کم نسبت  $\frac{R_s}{R_a}$  در روزهای بدون ابر می باشد. بدیهی است که در روزهای بدون ابر و صاف مقادیر  $R_a$  به عنوان عامل مهم تخمین  $R_s$  خواهد بود.

#### د) اعتبار سنجی مدل های مورد بررسی

عملکرد مدل های توسعه یافته و واسنجی شده برای منطقه ای خاص بایستی با استفاده از داده های مستقل اندازه گیری شده اعتبار سنجی گردد. برای سنجش اعتبار این مدل ها از داده های اندازه گیری شده در سال ۱۳۸۴ استفاده شد. نتایج مربوط به اعتبار سنجی این مدل ها به طور خلاصه در جدول ۱

هواشناسی دیگری نیز وابسته می باشد. مدل های زیادی نیز جهت تخمین  $R_s$  بر اساس اطلاعات هواشناسی ارائه گردیده اند که پیش تر به موارد متعددی از آنها اشاره گردید. در این بخش از مطالعه یک مدل منطقه ای جدید بر اساس داده های هواشناسی معمول ارائه می شود تا در مواقعی که تابش خورشیدی اندازه گیری 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، ۹ و ۱۳) عوامل مهم هواشناسی مؤثر بر مقدار  $R_s$ ، عوامل  $T_{mean}$ ،  $T_{max}$ ،  $T_{min}$ ،  $D$ ،  $P$ ،  $RH\%$  و  $n/N$  می باشد که با سعی و خطا و با استفاده از داده های اندازه گیری شده  $R_s$  و اطلاعات هواشناسی اندازه گیری شده در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، مدلی بر پایه اطلاعات هواشناسی به صورت زیر ارائه گردید:

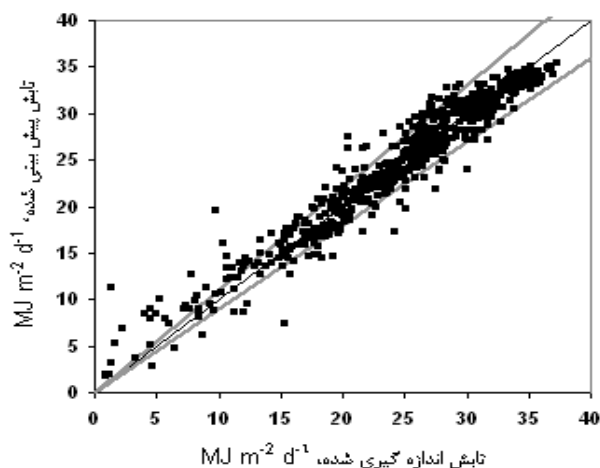
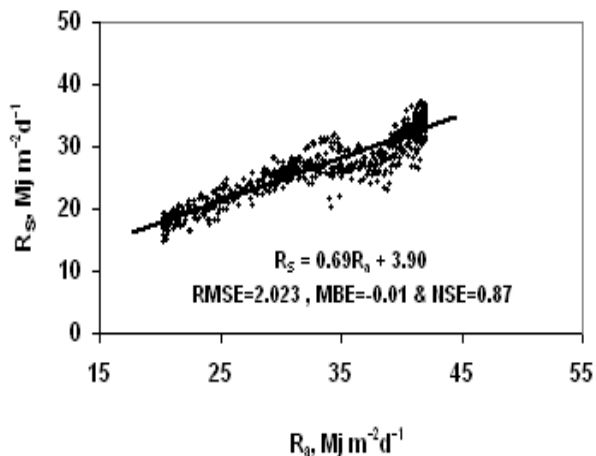
$$R_s = R_a [-0.5562D^2 - 0.0786D + 0.0003T_{mean}^2 - 0.0137T_{mean} - 0.0003(T_{max} - T_{min})^2 + 0.0129(T_{max} - T_{min}) - 0.0035P - 0.0024RH + 0.5161(\frac{n}{N}) + 0.5095] \quad [15]$$

$$RMSE = 1/93MBE, = 0.02 NSE \& = 0.94$$

که در این رابطه  $D$ ،  $RH$  و  $P$  به ترتیب کمبود فشار بخار اشباع (mbar)، درصد رطوبت نسبی و بارش روزانه (mm) می باشند. در شکل ۳ مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده  $R_s$  با معادله فوق نشان داده شده است. عوامل آماری  $RMSE$ ،  $MBE$  و  $NSE$  نشان می دهند که این معادله نسبت به معادلات دیگر دقت بالاتری دارد. با توجه به در دسترس بودن عوامل هواشناسی، کاربرد این معادله جهت تخمین  $R_s$  به خصوص در ایامی که مقدار آن اندازه گیری نمی شود، برای ایستگاه مورد مطالعه توصیه می گردد.

#### ج) واسنجی سایر مدل های تخمین تابش خورشیدی موجود

مدل های ساده ارائه شده توسط آنگستروم (۴)، هارگریوز و سامانی (۱۱)، هارگریوز و همکاران (۱۰) و آلن و همکاران (۲) به عنوان مدل های پایه مورد استفاده پژوهشگران مختلف می باشد. در مورد مدل آنگستروم قبلاً بحث شد. در این بخش به واسنجی



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

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

جدول ۱. عوامل آماری (RMSE و MBE، NSE) 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

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  $n/N$  به کار رفته بود دقت بالاتری دارند. این مسأله به دلیل 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 می‌تواند 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 نسبت  $n/N$ ، برای تخمین  $R_s$  استفاده نمی‌کنند دقت تخمین پایینی دارند.

آورده شده است. نتایج اعتبارسنجی مدل‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که مدل شماره ۱۵ که دارای نسبت  $n/N$  و سایر اطلاعات هواشناسی است، با مقایسه عوامل آماری  $MBE$ ،  $NSE$  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 به صورت‌های مختلف با استفاده از متوسط دمای هوای روزانه، جذر اختلاف حداکثر و حداقل دمای هوای روزانه اصلاح شد.

### منابع مورد استفاده

- کاشفی پور، س.م. و ع.ر. سپاسخواه. ۱۳۷۶. مجله علمی کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز ۲۰: ۱۷-۲۶.
- 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.
- Almorox, J. and C. Hontoria. 2004. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. Energy Convers. Manag. 45:1529-1535.
- Angstrom, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. Quart. J. Roy. Met. Soc. 50:121-125.
- 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.
- 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.
- Doorenbus, J. and W.O. Pruitt. 1984. Crop Water Requirements. FAO Irrig. and Drain. paper. No. 24. 144 P.
- El-Metwally, M. 2005. Sunshine and global solar radiation estimation at different sites in Egypt. J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. 7:1331-1342.
- Ertekin, C. and O. Yaldiz. 1998. Estimation of global solar radiation on horizontal surface (in Turkish). In: SunDay Symposium and Fair, 19-21 June, Izmir, Turkey.
- 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.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Eng. 108: 225-230.
- Malek, E. 1979. Determination of the constants for the global radiation equation at Badjgah, Iran Agrc. Meteorol. 20:233-235.
- 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.
- Mossad, E. 2004. Simple new methods to estimate global solar radiation based on meteorological data in Egypt. Atmos. Res. 69:217-239.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. J. Hydrol. 10:282-290.



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. Ojoso, 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.