

ارزیابی مدل درختی M5 و دو مدل تجربی مبتنی بر دمای هوا برای برآورد تابش خورشیدی با استفاده از LST در یک اقلیم نیمه خشک

سعید امامی فر^{۱*}، علی اکبر نوروزی^۲، سجاد سیدی حسینی^۳ و آذین کریم زاد انزابی^۴

(۱) دانشجوی دکتری؛ گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛ مشهد؛ ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: aftab2277@yahoo.com

(۲) استادیار پژوهشی؛ پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری؛ تهران؛ ایران

(۳) دانش‌آموخته کارشناسی؛ گروه مهندسی آب؛ پردیس ابوریحان؛ دانشگاه تهران؛ تهران؛ ایران

(۴) دانشجوی کارشناسی؛ گروه مهندسی آب؛ پردیس ابوریحان؛ دانشگاه تهران؛ تهران؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۲۸

چکیده

تابش خورشیدی از پارامترهای ورودی برای بسیاری از مطالعات شبیه‌سازی مانند فرآیندهای وابسته به تغییرات آب و هوایی، هیدرولوژی و اکولوژی است. مدل‌های پیشنهادی به منظور برآورد این پارامتر به علت این که از داده‌های هواشناسی از نوع مکانی نقطه‌ای استفاده می‌کنند، برآورد نقطه‌ای از مقدار تابش ارائه می‌کنند. در این پژوهش، دو مدل تجربی هارگریوز-سامانی و محمود-هابرد که مبتنی بر داده‌های دمای هوا هستند، با ورودی داده‌های روزانه LST (دمای سطح زمین) محصولات MOD11A1 و MYD11A1 سنجنده مودیس به جای دمای هوا، برای تخمین تابش خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفتند. داده‌های روزانه تابش خورشیدی ایستگاه سینوپتیک اهواز واقع در استان خوزستان در دو سال متوالی (سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) به عنوان داده‌های واقعی استفاده شد. نتایج حاصل از اعتبار سنجی نشان داد که مدل هارگریوز-سامانی با ورودی LST محصولات MOD11A1 و مدل محمود-هابرد با ورودی LST محصولات MYD11A1 به ترتیب دارای بیشترین و کمترین دقت در برآورد تابش خورشیدی هستند. برای این مدل‌ها، شاخص‌های آماری R^2 و RMSE به ترتیب 0.83 و 0.79 (Mj m-2 d-1) و 0.79 و 0.46 (Mj m-2 d-1) و 0.79 و 0.46 (Mj m-2 d-1) و 0.79 و 0.46 (Mj m-2 d-1) بدست آمد. برای مدل هارگریوز سامانی همچنین، با استفاده از مدل درختی M5 دو مدل (RS-M5-2 و RS-M5-1) مبتنی بر داده‌های LST محصولات MOD11A1 مودیس متغیرهای جغرافیایی تدوین و نتایج حاصل از آن‌ها با نتایج مدل‌های تجربی مقایسه شد. نتایج نشان داد که در مقایسه بین مدل درختی RS-M5-1 و مدل‌های تجربی با ورودی مشابه، مدل درختی M5 از دقت بیشتری برخوردار است. به طور کلی، مدل درختی RS-M5-2 با ورودی‌های LST محصولات MOD11A1، ساعت آفتابی حداکثر و واقعی و همچنین تابش فرا زمینی، نسبت به مدل‌های دیگر دارای دقت بیشتری است. برای این مدل، مقادیر آماره‌های R^2 و NSE به ترتیب برابر 0.87 و 0.86 و جذر میانگین مربعات خطا برابر $10/24$ درصد برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: تابش خورشیدی؛ دمای هوا؛ MODIS

مقدمه

همچنین، تابش خورشیدی یکی از پارامترهای ورودی برای بسیاری از مطالعات شبیه‌سازی مانند فرآیندهای وابسته با تغییرات آب و هوایی، هیدرولوژی و اکولوژی می‌باشد (Rivington et al., 2005؛ بابائیان و همکاران،

تابش خورشیدی رسیده به زمین بخش ضروری در مدل‌های تبخیر و تعرق و مدل‌های هیدرولوژی است که تبادل آب و گرما را کنترل می‌کند (Qin et al., 2011).

ورودی این مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد در بین مدل‌های مورد بررسی، مدل هارگریوز نتیجه بهتری ارائه می‌دهد و دقت ETo برآورده شده با این مدل برابر $0/47$ میلی‌متر در روز بود (Maeda *et al.*, 2011).

مرادی و رحیمی خوب (۱۳۹۱) از مدل درختی M5، برای تبدیل داده‌های دمای سطح زمین و تابش فرازمینی به تبخیر و تعرق مرجع در شبکه آبیاری قزوین استفاده کردند. در این بررسی، برای برآورد دمای سطح زمین از الگوریتم روزنه مجزا^۱ یولیوری و همکاران (1994) بر اساس داده‌های سنجنده AVHRR ماهواره نوا (NOAA) استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل تدوینی مبتنی بر داده اختصاص داده شده در مرحله آزمون، می‌تواند مقدار ETo را با ضریب تبیین، درصد جذر میانگین مربعات خطا و درصد میانگین انحراف خطا به ترتیب $0/81$ ، $0/08$ درصد و $0/02$ درصد برآورد نماید.

از داده‌های LST محصولات MOD11A1 سنجنده مودیس در ترکیب با متغیرهای جغرافیایی (روز از سال و تابش فرا زمینی) به عنوان ورودی‌های مدل درختی M5 برای برآورد متوسط روزانه دمای هوا، در استان خوزستان استفاده شد. نتایج نشان داد دقت مدل تدوینی در تخمین متوسط روزانه دمای هوا دارای ضریب تبیین برابر $0/96$ و میانگین مربعات خطای برابر $2/3$ درجه سانتی‌گراد است (Emamifar *et al.*, 2013). در بین مدل‌های تجربی ارائه شده در برآورد تابش خورشیدی، مدل‌هایی مبتنی بر پارامترهای دمای هوا و در بعضی موارد پارامتر بارندگی، تدوین یافته‌اند. که از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل-های هارگریوز - سامانی و محمود - هابرد اشاره کرد. از طرفی پژوهش‌ها نشان داده است که بین دمای سطح زمین^۲ (LST) محصولات سنجنده مودیس و دمای هوا همبستگی بالایی وجود دارد (Emamifar *et al.*, 2013; Vancutsem *et al.*, 2010; Yan *et al.*, 2009; Sheng pan *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2012). با توجه به این همبستگی، سوال این

۱۳۹۲؛ سیمایی و همکاران، ۱۳۹۲). برای برآورد تابش خورشیدی بهترین و قابل اعتمادترین روش، نصب پیرانومترها در ایستگاه‌ها و خواندن اطلاعات ضبط شده به‌وسیله آن‌ها می‌باشد. اما، به دلیل مشکلات اقتصادی و فقدان امکانات اندازه‌گیری، این پارامتر به‌طور محدود انجام می‌شود و این نقیصه حتی در کشورهای در حال توسعه نیز به چشم می‌خورد (Samani, 2000). از این‌رو، پژوهشگران سعی بر آن داشته‌اند بر مبنای استفاده از روابط و مدل‌های ریاضی که بین تابش خورشیدی و عوامل آب و هوایی از قبیل ساعت آفتابی، رطوبت نسبی و یا دمای حداقل و حداکثر هوا را که اندازه‌گیری آن‌ها آسان‌تر است، برای تخمین آن استفاده کنند (Angstrom, 1924; Hargreaves & Samani, 1982). این معادلات، به علت این‌که از داده‌های هواشناسی از نوع مکانی نقطه‌ای استفاده می‌کنند، در نتیجه مقدار تابش تخمینی به‌وسیله آن‌ها نیز نقطه‌ای خواهد بود. به عبارتی، مقدار تابش تخمینی فقط در محدوده نزدیک ایستگاه دارای اعتبار است.

بر طبق بررسی‌های صورت گرفته، داده‌های سنجش از دور می‌توانند به‌طور قابل قبولی پارامترهای هواشناسی را از نظر مکانی و زمانی در اختیار کاربران قرار دهند. (Qin *et al.*, 2011; Wan, 2008) ترکیب مدل‌های برآورد پارامترهای هواشناسی و داده‌های سنجش از دور امکان بررسی تغییرات مکانی را در سطوح گسترده و وسیع فراهم می‌کند. از مدل شبکه عصبی با ورودی محصولات مختلف سنجنده مودیس شامل، متوسط ماهانه دمای سطح زمین (LST) و شاخص پوشش گیاهی در ترکیب با داده-های زمینی برای برآورد تابش خورشیدی استفاده شد که نتایج نشان داد مدل تدوینی دارای دقت بالایی است (Qin *et al.*, 2011).

در پژوهشی، با استفاده از سه مدل تجربی هارگریوز، تورنت وایت و بلینی - کریدل برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع در منطقه‌ای در کنیا پرداخته شد. در این پژوهش، پارامترهای دمای سطح زمین به دست آمده از تصاویر مودیس به جای پارامترهای دمای هوا به عنوان

¹ Split Window

² Land Surface Temperature

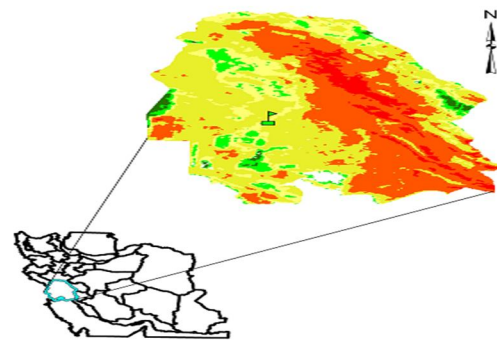
داده‌های ماهواره‌ای

در این پژوهش از داده‌های سنجنده مودیس که از جمله سنجنده‌های ماهواره‌های ترا و آکوا است، استفاده شد. طراحی اجزای این سنجنده با اعمال سیگنال به نویز بالا می‌باشد که قابلیت استفاده از این سنجنده را در علوم مانند کشاورزی، هواشناسی، زمین‌شناسی و اقیانوس‌شناسی مهیا می‌کند. سنجنده مودیس به‌طور روزانه یکسری مشاهدات در مقیاس جهانی بر روی دریا، خشکی و اتمسفر انجام می‌دهد و دارای یک پوشش ممتد و وسیع طیفی و مکانی با قدرت تفکیک ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر است. بنابراین، بررسی و ارزیابی تغییرات بلندمدت در دریا، خشکی و اتمسفر با استفاده از مودیس امکان‌پذیر می‌باشد. تصاویر مورد استفاده در این پژوهش جزء زیر گروه داده‌های سطح سه (L3) سنجنده مودیس با کد مشخصه MOD11A1 مربوط به ماهواره ترا و MYD11A1 مربوط به ماهواره آکوا هستند. از ویژگی‌های این محصولات این است که دارای توان تفکیک مکانی یک کیلومتر و قدرت تفکیک زمانی روزانه و حاوی اطلاعات روزانه دمای سطح زمین و گسیلندگی می‌باشند. محصولات دمای سطح زمین، سنجنده مودیس از دو باند مادون قرمز حرارتی کانال‌های ۳۱ (محدوده طول موج ۱۰/۷۸ تا ۱۱/۲۸ میکرو متر) و ۳۲ (محدوده طول موج ۱۱/۷۷ تا ۱۲/۲۷ میکرو متر) با استفاده از الگوریتم پنجره مجزابدست آمده‌اند (Wan 1999 ; Wan et al. 2002). در مجموع، ۶۹۱ تصویر سنجنده مودیس مربوط به ماهواره-های ترا و آکوا (۳۵۴ تصویر محصول MOD11A1 سنجنده مودیس ماهواره ترا و ۳۳۷ تصویر محصول MYD11A1 سنجنده مودیس ماهواره آکوا) از طریق پایگاه اینترنتی <http://modis.gsfc.nasa.gov> مربوط به سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ اخذ شد. صاف و بدون ابری بودن هوا، دلیل انتخاب این تصاویر بود. تغییر سیستم مختصات تصاویر از سینوسی به UTM با استفاده از ابزار^۳ MRT^۳ استخراج اطلاعات LST در محل ایستگاه اهواز، در محیط

است که اگر LST محصولات دمایی سنجنده مودیس (MOD11A1 سنجنده مودیس ماهواره ترا و MYD11A1 سنجنده مودیس ماهواره آکوا) به جای دمای هوا در مدل-های فوق استفاده شود، دقت برآورد تابش خورشیدی چه مقدار است؟ با توجه به نتایج خوب مدل درختی M5 به خصوص در مطالعات سنجش از دور (مرادی و رحیمی خوب، ۱۳۹۱؛ Emamifar et al., 2013). مقایسه عملکرد این مدل با پارامترهای ورودی مشابه مدل‌های فوق برای تخمین تابش خورشیدی و مدل‌های تجربی یکی دیگر از اهداف این پژوهش است. همچنین، مقایسه دقت برآورد تابش خورشیدی مدل‌ها بر اساس نوع محصول دمایی مورد استفاده، هدف سوم این پژوهش محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، اطلاعات تابش خورشیدی ایستگاه هواشناسی اهواز واقع در استان خوزستان (شکل ۱) که دارای عرض جغرافیایی ۳۱/۳۳ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۴۸/۶۷ درجه شرقی و ارتفاع ۲۲/۵ متر از سطح دریا می‌باشد، در دو سال متوالی (سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) به عنوان داده‌های واقعی استفاده شد. متوسط روزانه حداقل و حداکثر دمای هوا در این دوره به ترتیب برابر ۲۱/۸ و ۳۸/۰۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این منطقه با متوسط بارندگی سالانه تقریباً ۲۲۰ میلی‌متر در سال جزء مناطق اقلیمی نیمه خشک می‌باشد. شکل (۱) موقعیت کلی ایستگاه اهواز را بر روی یک تصویر ماهواره ترا نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت مکانی ایستگاه اهواز نسبت به استان

خوزستان

^۳ MODIS Reprojection Tool

وابسته، توسط کوئینلان (1986) ارائه شد. این مدل ترکیبی از مدل‌های رگرسیون خطی و درختی است و برای هر نوع داده کمی و کیفی قابل استفاده است (Mitchell, 1997, 1992). در مدل درختی M5 محدود داده‌ها به زیر ناحیه‌هایی که اصطلاحاً برگ^۵ نامیده می‌شوند، تقسیم شده و بر خلاف مدل رگرسیون درختی که به هر یک از برگ‌ها یک برچسب عددی نسبت می‌دهد، این مدل معادله رگرسیون خطی را جایگزین برچسب عددی در گره‌ها می‌کند و به این طریق می‌توان متغیرهای عددی پیوسته را نیز پیش‌بینی یا برآورد کرد. هر درخت تصمیم‌گیری دارای ساختاری شبیه درخت است که از ریشه^۶، شاخه‌ها^۷، گره‌ها^۸، و برگ‌ها^۹ تشکیل یافته است و از بالا به پایین ترسیم می‌شود. در این ساختار، ریشه به عنوان اولین گره در بالا قرار گرفته و زنجیره‌ای از شاخه‌ها و گره‌ها به برگ‌ها ختم می‌شود. عمل انشعاب در گره‌ها به وسیله شاخه‌ها صورت می‌گیرد و هر گره معرف یک متغیر پیش‌بینی کننده است. هر شاخه که یک بازه عددی را شامل می‌شود، از گره والد^{۱۰} منشعب شده و به یک گره فرزند^{۱۱} می‌رسد.

ساخت مدل درخت تصمیم‌گیری با استفاده از مدل M5 در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول درخت تصمیم بر اساس شاخص، بیشینه‌سازی کاهش انحراف معیار داده‌ها در گره فرزند، با انشعاب سازی داده‌ها تشکیل می‌شود. کاهش انحراف معیار از رابطه (۱) برآورد می‌شود (Quinlan, 1986).

$$SDR = sd(t) - \sum \frac{|T_i|}{|T|} sd(T_i) \quad (4)$$

که در آن: SDR کاهش انحراف معیار در گره فرزند، T مجموعه داده‌های ورودی به گره والد، T_i زیرمجموعه از

نرم‌افزار ARCGIS9.3 با استفاده از ابزار HAT^۴ انجام گرفت. مقادیر LST استخراج شده از تصاویر بر حسب کلون می‌باشند. لذا، قبل از استفاده از آن‌ها به عنوان ورودی مدل‌ها، این مقادیر به واحد درجه سلسیوس تغییر داده شد.

معادلات تجربی

در این پژوهش، معادلات تجربی هارگریوز - سامانی و محمود - هابرد برای تخمین تابش خورشیدی براساس محصولات LST سنجنده مودیس به عنوان ورودی این مدل‌ها به جای دمای هوا، مورد ارزیابی قرار گرفت. هارگریوز و سامانی (۱۹۸۲) برای اساس تابش برون‌زمینی و اختلاف دمای هوای کمینه (Tmin) و بیشینه (Tmax) معادله زیر را برای تخمین تابش خورشید ارائه دادند.

$$H - S \gg R_s \quad (1)$$

$$= K \times R_a \times \sqrt{(T_{max} - T_{min})}$$

که در آن: K ضریب ثابت می‌باشد و مقدار آن برای مناطق ساحلی و غیر ساحلی به ترتیب ۰/۱۹ و ۰/۱۶ است (Hargreaves, 1994).

محمود و هابرد (۲۰۰۲) نیز بر اساس استفاده از دمای کمینه و بیشینه مقدار تابش خورشیدی را به صورت رابطه (۲) تخمین زدند و برای خنثی کردن اثر خطاهای سیستماتیک در تخمین تابش، مقدار تابش خورشیدی را به صورت رابطه (۳) که در آن R_{smod} تابش کل تصحیح شده می‌باشد، ارائه نمودند. در رابطه (۲) مقدار a ضریب تجربی بوده و برابر ۰/۱۸ می‌باشد.

$$R_s = a \times R_a^{.91} \times (T_{max} - T_{min})^{.69} \quad (2)$$

$$M - H \gg R_s = \frac{R_s - 2.4999}{.8023} \quad (3)$$

مدل درختی M5

مدل درختی M5 مبتنی بر روش طبقه‌بندی درختی است که برای ایجاد رابطه بین متغیرهای مستقل و

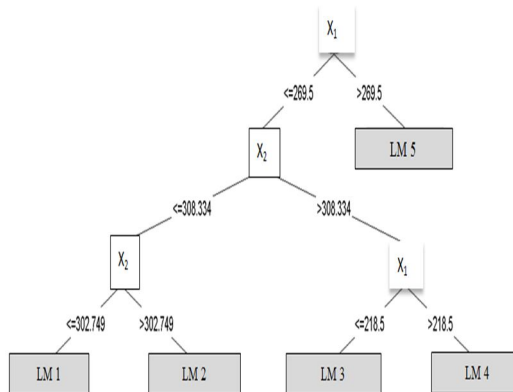
- 5 Leaf
- 6 Root
- 7 Branches
- 8 Nodes
- 9 Leaves
- 10 Parent node
- 11 Child node

⁴Hawth Analysis Tools

(LST_{NT} بر حسب درجه سانتی گراد)، دمای شب سطح زمین مربوط به محصول MYD11A1 سنجنده مودیس - ماهواره آکوا (LST_{NA} بر حسب درجه سانتی گراد)، دمای روز سطح زمین مربوط به محصول MOD11A1 سنجنده مودیس - ماهواره تراس (LST_{DT} بر حسب درجه سانتی گراد) و دمای روز سطح زمین مربوط به محصول MYD11A1 سنجنده مودیس - ماهواره آکوا (LST_{DA} بر حسب درجه سانتی گراد) و پارامتر تابش برون زمینی (R_a بر حسب مگاژول بر متر مربع بر روز) که اثر فصلی تابش خورشید را منعکس می کند، بود.

پارامتر تابش برون زمینی (R_a) داده اندازه گیری نیست و تابعی از عرض جغرافیایی و موقع روز از سال است و در این پژوهش برای تعیین آن از روابط پیشنهادی آلن و همکاران استفاده شد (Allen et al., 1998). ضریب مدل-های تجربی مورد استفاده در این پژوهش، مخصوص منطقه مورد مطالعه آن پژوهش می باشد و لذا بسته به شرایط جوی (رطوبت، گرد و غبار) و میل خورشیدی (عرض جغرافیایی و ماه)، این ضرایب برای هر موقعیت باید واسنجی شوند. از این رو در، این پژوهش، ۷۰ درصد داده ها به واسنجی ضرایب مدل ها و ۳۰ درصد دیگر آن ها به اعتبار سنجی مدل ها اختصاص داده شد، با این تفاوت که به جای استفاده از داده های دمای هوا از داده های LST محصولات مودیس در این مدل ها استفاده شد. برای ارزیابی دقت مدل های مورد بررسی و مقایسه نسبی آنها با مقادیر اندازه گیری شده تابش رسیده به زمین به وسیله پیرانومتر، علاوه بر تفسیر بصری نتایج از آماره های ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و معادله ناش و ساتکلیف (Nash & Sutcliffe, 1970) (NSE) و همچنین به منظور فهم بهتر نسبت به درصد میزان خطای مدل ها از آماره های درصد جذر میانگین مربع خطا (PRMSE) و درصد میانگین انحراف خطا (PMBE) نیز استفاده شد:

داده های ورودی به گره والد، و S_d انحراف از معیار است. پس از آزمودن همه تقسیم های ممکن، مدل M5 انشعابی را که بیشترین کاهش انحراف معیار را در تولید می کند، انتخاب می شود. این تقسیم ها غالباً منجر به تولید یک سازه درخت مانند حجیم خواهد شد که در نتیجه آن ممکن است روی داده های آموزشی برازش بیش از حد رخ داده و باعث کاهش یافتن کلیت بخشی مدل شود. به عبارتی، برازش بیش از حد سبب می شود که مدل فقط برای داده هایی که برای آن ساخته شده، اعتبار داشته باشد و برای داده های جدید از دقت لازم برخوردار نباشد (مرادی و رحیمی خوب ۱۳۹۱). برای غلبه بر این مشکل، می توان از هرس سازی شاخه ها و جایگزینی کردن توابع رگرسیونی به جای آن ها که در واقع مرحله دوم طراحی مدل درختی محسوب می شود، استفاده کرد. در این پژوهش، از الگوریتم کوئینلن (۱۹۹۲) به منظور هرس کردن درخت استفاده شد. شکل (۲) شمای روند تقسیم فضای داده های ورودی در مدل سازی با استفاده از مدل M5 را بر اساس دو متغیره X_1 و X_2 (متغیرهای مستقل) که به پنج مدل رگرسیون خطی در برگ ها (بر چسب های LM1 تا LM5) منتهی شده را نشان می دهد.



شکل ۲. شمای کلی ساختار سلسه مراتبی مدل درختی M5

داده های لایه ورودی مدل های مورد بررسی تلفیقی از داده های ماهواره ای شامل دمای شب سطح زمین مربوط به محصول MOD11A1 سنجنده مودیس - ماهواره تراس

سطح زمین و دمای هوا برای مقیاس‌های مختلف دمایی (حدافل، حداکثر و متوسط) دارای همبستگی بالایی ($R^2 > 0.88$) هستند و در این بین، همبستگی داده‌های دمای کمینه (LST_N و T_{min}) در مقایسه با داده‌های دمای بیشینه (LST_D و T_{max}) بیشتر است. بررسی‌های صورت گرفته در برآورد دمای هوا نیز به طور مشابه ثابت کرده‌اند که میزان همبستگی محصولات LST_N و T_{min} در مقایسه با همبستگی محصولات LST_D و T_{max} بیشتر است (Qin et al., 2010; Wan, 1999). شکل ۱ نشان می‌دهد پراکندگی پارامترهای T_{max} با محصولات LST_{DT} در مقایسه با محصولات LST_{DA} به خط $y=x$:۱ نزدیک‌تر است و عکس این نتیجه در مورد دمای کمینه صادق است. ضریب تبیین بالای ۰/۹ در همبستگی بین متوسط دمای هوا و محصولات LST بیانگر آن است که بیش از ۹۰ مقدار متوسط دمای هوا با استفاده از محصولات LST مودیس قابل توجیه می‌باشد (شکل ۱).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Si - \bar{Si})(Ci - \bar{Ci})]^2}{\sum_{i=1}^n (Si - \bar{Si})^2 \sum_{i=1}^n (Ci - \bar{Ci})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (si - ci)^2}{n} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$MBE = \sum_{i=1}^n (si - ci) / n \quad (7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (si - ci)^2}{\sum_{i=1}^n (Ci - \bar{Ci})^2} \quad (8)$$

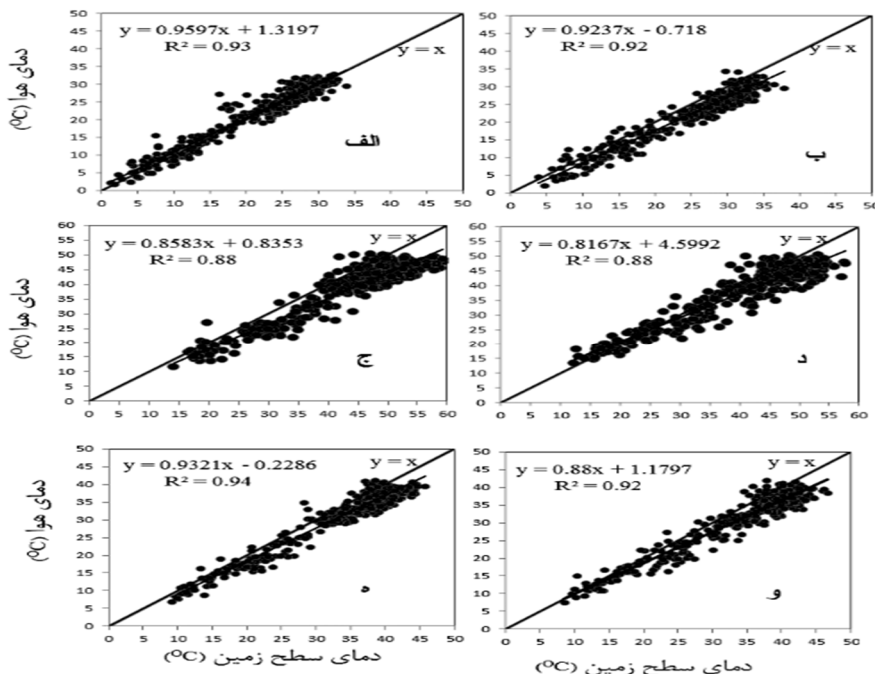
$$PRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Ci}} \times 100 \quad (9)$$

$$PMBE = \frac{MBE}{\bar{Ci}} \times 100 \quad (10)$$

که در آن‌ها: Ci و Si به ترتیب i امین داده واقعی (اندازه‌گیری شده) و برآورده شده، \bar{Ci} ، \bar{Si} مقادیر میانگین کل داده‌های Ci و Si در کل جامعه آماری n و تعداد کل نمونه‌های ارزیابی شده می‌باشند (امیری و همکاران، ۱۳۹۱).

نتایج و بحث

در مرحله اول این پژوهش، میزان همبستگی محصولات سنجنده مودیس، ماهواره‌های ترا و آکوا با دمای هوا مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج این بررسی‌ها در شکل (۳) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، دمای



شکل ۳. همبستگی بین دمای هوا و LST محصولات مودیس. (الف) کمینه دمای هوا و LST محصولات MYD11A1 (ب) کمینه دمای هوا و LST محصولات MOD11A1 (ج) بیشینه دمای هوا و LST محصولات MYD11A1 (د) بیشینه دمای هوا و LST روز محصولات MOD11A1 (ه) متوسط دمای هوا و LST محصولات MYD11A1 (و) متوسط دمای هوا و LST محصولات MOD11A1

با توجه به جدول ۱ همچنین، ملاحظه می‌شود که مقادیر ضرایب واسنجی شده برای مدل‌های مورد بررسی، بسته به این‌که از کدام نوع محصول LST استفاده شود، نیز دارای تفاوت هستند. بنابراین، در صورت استفاده از این محصولات باید به این نکته توجه شود.

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی معادلات تجربی ضرایب مدل‌های مورد ارزیابی قبل از واسنجی شدن (ضرایب اصلی) و همچنین بعد از واسنجی (بر اساس داده‌های LST) در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر ضرایب واسنجی شده با ضرایب پیشنهادی متفاوت است. از این‌رو، برای هر منطقه واسنجی مدل تجربی قبل از استفاده از آنها الزامی می‌باشد.

جدول ۱. ضرایب اصلی و واسنجی شده معادلات تجربی مورد بررسی

H-S kr	M-H A	ضریب
۰/۱۵۴	۰/۱۵۲	واسنجی شده با LST محصولات MO11A1
۰/۱۳۶	۰/۱۳۲	واسنجی شده با LST محصولات MY11A1

RMSE برابر ۲/۴۶ و ۳/۰۴ مگاژول بر متر مربع در روز هستند و به طور مشابه مقدار این آماره برای مدل-های H-S** و M-H** که مبتنی بر داده‌های LST محصولات MYD11A1 هستند، به ترتیب برابر ۲/۶۱ و ۴/۰۹ می‌باشد. به طور کلی بر اساس ضریب R^2 و ضریب NSE، مدل‌های H-S* و H-S** بیشترین همبستگی را با مقادیر واقعی تابش، نشان می‌دهند. اما با توجه به تفاوت ناچیز این آماره‌ها در این مدل‌ها و مقادیر کمتر شاخص RMSE در مدل H-S* می‌توان این مدل را به عنوان مناسب‌ترین مدل تجربی برآورد تابش خورشیدی در این منطقه معرفی کرد.

نتایج عملکرد مدل‌های مورد بررسی در مرحله اعتبارسنجی در جدول ۲ نشان داده شده است. بر اساس شاخص ضریب تبیین هر چهار مدل با همبستگی قابل قبولی (ضریب تبیین بالاتر از ۰/۸ درصد) تابش روزانه خورشید را برآورد می‌کنند. جدول ۲ همچنین نشان می‌دهد که برای هر دو مدل تجربی، مدل تدوین شده با ورودی داده‌های LST محصولات MOD11A1 نسبت به مدل تدوین شده با ورودی داده‌های LST محصولات MYD11A1 از دقت بهتری برخوردار است. با توجه به جدول ۲، در بین مدل‌های مبتنی بر داده‌های LST محصولات MOD11A1، مدل‌های H-S* و M-H* از نظر خطای کل در برآورد تابش خورشیدی، دارای مقادیر

جدول ۲. نتایج حاصل از آماره‌های اعتبارسنجی مدل‌های مورد بررسی

نام مدل	R^2	NSE	RMSE(mj m-2 d-1)
H-S*	۰/۸۳	۰/۷۸	۲/۴۶
H-S**	۰/۸۲	۰/۷۸	۲/۶۱
M-H*	۰/۸۰	۰/۶۶	۳/۰۴
M-H**	۰/۷۹	۰/۴۷	۴/۰۹

* پارامتر ورودی مدل داده‌های LST محصولات MOD11A1 است.

** پارامتر ورودی مدل داده‌های LST محصولات MYD11A1 است.

مقایسه نتایج مدل درختی M5 و معادلات تجربی در این مرحله از پژوهش، با توجه به اینکه مدل‌های تجربی مورد بررسی، با داده ورودی LST محصولات MOD11A1 دارای دقت بالاتری بودند. لذا، به طور مشابه داده‌های ورودی اختصاص داده شده برای واسنجی و اعتبار سنجی این مدل‌ها، به عنوان ورودی مدل درختی M5 به منظور تخمین تابش خورشیدی استفاده شد. از سویی، چون علاوه بر پارامترهای دمای هوا و تابش فرازمینی، پارامتر ساعت آفتابی واقعی و ساعت آفتابی حداکثر را که در بین مدل‌های مبتنی بر ساعت آفتابی، بیشترین تاثیر را بر روی تابش خورشیدی دارد، به عنوان یکی دیگر از پارامترهای ورودی مدل درختی M5 استفاده شد و به عنوان دومین مدل تدوین شده با استفاده از الگوریتم M5 مورد ارزیابی قرار گرفت. ساعت آفتابی حداکثر پارامتر اندازه‌گیری نیست و در این مطالعه برای برآورد آن از روابط پیشنهادی آن همکاران استفاده شد (Allen et al., 1998).

مشخصات مدل‌های تدوینی با استفاده از مدل درختی M5 و نتایج حاصل از عملکرد آن‌ها در مرحله اعتبارسنجی در جدول ۳ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در مقایسه نتایج مدل درختی M5 و مدل‌های تجربی، مدل‌های درختی دارای دقت مطلوب‌تری در محاسبه تابش خورشیدی هستند. به عنوان مثال، در بین مدل‌های تجربی، مدل H-S* در تخمین تابش خورشیدی دارای دقت بالاتری بوده و مقادیر NSE و RMSE برای آن به ترتیب ۰/۷۸ و ۲/۴۶ مگاژول بر متر مربع در روز بوده است که در مدل RS-M5-1 با متغیرها و داده‌های ورودی مشابه به ترتیب ۰/۸۳ و ۲/۲۲ مگاژول بر متر مربع در روز تغییر می‌یابند. مدل RS-M5-2 که در آن از پنج پارامتر برای ورودی مدل استفاده شده است، از نظر شاخص‌های آماری دارای نتایج دقیق‌تری نسبت به همه مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه است، به طوری که مقادیر شاخص‌های R^2 ، NSE و RMSE برای آن به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۸۶ و ۱/۹۸ مگاژول بر مترمربع در روز برآورد شد. اگر چه

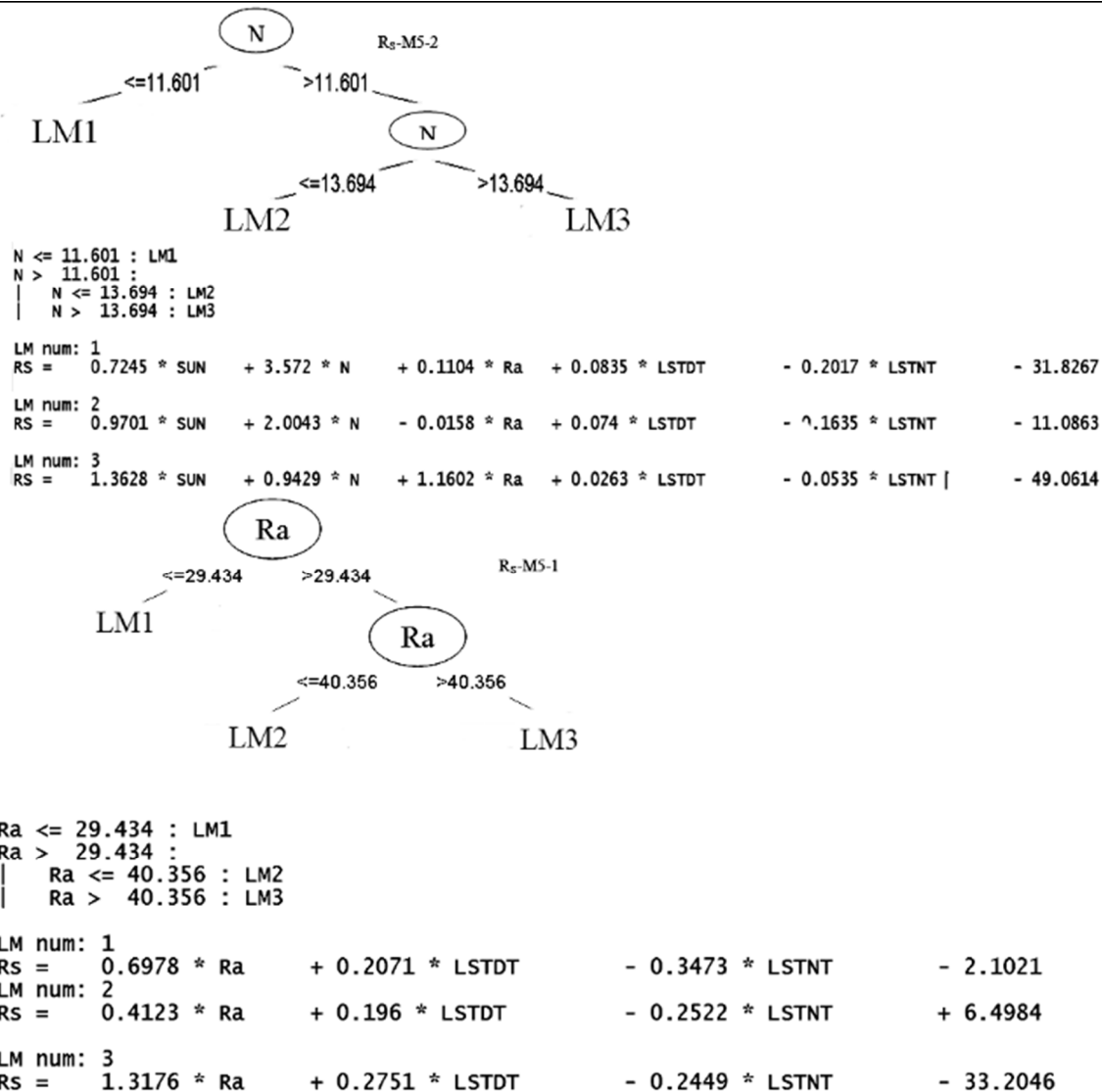
مدل RS-M5-2 برای برآورد تابش خورشیدی در مقایسه با سایر مدل‌ها دارای عملکرد بهتری است، لیکن با توجه به این که مدل RS-M5-1 فقط مبتنی بر داده‌های دمای سطح زمین و تابش برون‌زمینی است و با توجه به نتایج مطلوب آن، برای ایستگاه‌های فاقد دستگاه اندازه‌گیری ساعت آفتابی قابل توصیه است.

ساختار مدل درختی M5 هر دو مدل تدوینی، برای تخمین تابش خورشیدی در شکل ۴ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که متغیره تصمیم‌گیری مدل‌ها با هم متفاوت است. به عبارتی، در مدل RS-M5-2، پارامتر ساعت آفتابی حداکثر به عنوان متغیره تصمیم‌گیری تعیین شده و بر اساس سه گزاره شرطی در مدل درختی به سه برگ منتهی می‌شود، در صورتی که در RS-M5-1 این پارامتر تابش فرازمینی است که به عنوان متغیره تصمیم‌گیرنده تعیین شده و همانند مدل RS-M5-2 در نهایت بر اساس سه گزاره شرطی در مدل درختی به سه برگ منتهی شده است.

ساختار مدل RS-M5-1 بیانگر آن است که اگر تابش فرازمینی، کمتر یا مساوی ۲۹/۴۳۴ مگاژول بر مترمربع در روز باشد، مدل خطی LM1 برای تخمین تابش خورشیدی استفاده می‌شود. در غیر این صورت، گره سمت راست ساختار درختی بررسی می‌شود. در این مرحله، اگر تابش فرازمینی، کمتر یا مساوی ۴۰/۳۵۶ مگاژول بر متر مربع در روز باشد (با حفظ شرط بزرگتر بودن تابش فرازمینی از ۲۹/۴۳۴ مگاژول بر متر مربع در روز)، مدل خطی LM2 و در غیر این صورت (تابش فرازمینی، بزرگتر از ۴۰/۳۵۶) از مدل خطی LM3 برای برآورد تابش خورشیدی استفاده می‌شود. به طور مشابه، این تفسیر در مورد ساختار درختی مدل RS-M5-2 صادق است.

جدول ۳. مشخصات مدل‌های درختی M5 برای تخمین تابش خورشیدی و عوامل آماری حاصل از اعتبارسنجی آنها

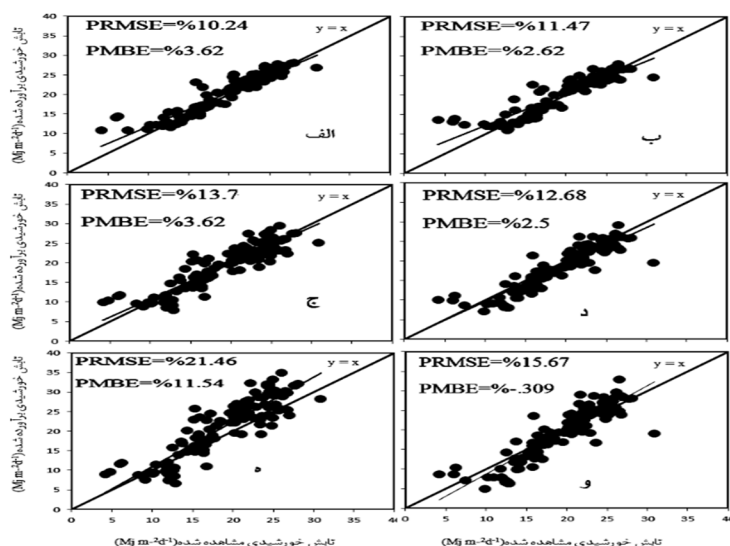
شماره مدل	نام مدل	داده‌های ورودی	آماره‌های ارزیابی		
			RMSE(mj m ⁻² d)	NSE	R ²
۱	R _S -M5-1	R _a , LST _{DT} , LST _{DN}	۲/۲۲	۰/۸۳	۰/۸۳
۲	R _S -M5-2	R _a , n, N, LST _{DT} , LST _{DN}	۱/۹۸	۰/۸۶	۰/۸۷



شکل ۴. ساختار مدل درختی M5 در برآورد تابش خورشیدی بر اساس مدل‌های تدوینی، به ترتیب از بالا به پایین R_S-M5-1, R_S-M5-2

MOD11A1 است، در مقایسه با سایر مدل‌ها به خط ۱:۱ نزدیک‌تر است و این نشان می‌دهد که این مدل نسبت به دیگر مدل‌ها دقت بهتری دارد.

نمودار پراکنش مقادیر تابش مشاهده شده و برآورده شده با استفاده از مدل‌های مورد بررسی در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، معادله خطی همبستگی مدل R_S-M5-2 که مبتنی بر LST محصولات



شکل ۵. مقادیر تابش خورشیدی اندازه‌گیری شده و برآورده شده حاصل از روش‌های تجربی و مدل درختی M5

برآورد تابش خورشید استفاده کرده بودند، نشان داد که مدل هاگریوز-سامانی در مقایسه با مدل محمود-هابرد دارای دقت بهتری است. همچنین، نتایج نشان داد که برای هر مدل تجربی، مدل تدوینی مبتنی بر داده‌های ورودی LST محصولات MOD11A1 در مقایسه با محصولات MYD11A1، دارای عملکرد بهتری هستند. مقایسه بین مدل‌های تجربی و مدل درختی M5 با ورودی‌های مشابه، نشان داد که مدل R_S-M5-1 با مقدار PRMSE برابر ۱۱/۴۷٪ دارای خطای کمتری است. از میان همه مدل‌های مورد بررسی، مدل درختی R_S-M5-2 با ورودی‌های تابش فرازمینی، ساعت آفتابی واقعی و حداکثر و LST محصولات MOD11A1 با RMSE برابر ۱/۹۸ مگاژول بر متر مربع بر روز و R² برابر ۸۷٪ نسبت به تمامی مدل‌های مورد بررسی از دقت بالاتری برخوردار است.

فهرست منابع

امیری، س.، قیصری، م. و کیانی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی کارایی آمار بلندمدت هواشناسی در مدیریت آبیاری قطره‌ای و بارانی. مجله حفاظت منابع آب و خاک، ۲ (۱): ۱-۱۲.
بابائیان، ا.، همایی، م. و نوروزی، ع. ا. ۱۳۹۲. اشتقاق و اعتبارسنجی توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای در گستره VIS-

مقایسه مقدار درصد میانگین خطای اریب (PMBE) بیانگر آن است که در مجموع همه مدل‌های مورد بررسی بجز M-H*، در برآورد تابش خورشیدی بیش‌برآوردگر هستند و در این راستا مدل‌های H-S* و M-H** به ترتیب کمترین و بیشترین بیش‌برآوردی را دارند. درصد میانگین خطای اریب (PMBE) مدل M-H* مقداری منفی و نزدیک به صفر است و بیانگر آن است که این مدل تابش خورشیدی را به مقدار کمی کم برآورد می‌کند. مقایسه مقادیر آماره PRMSE نشان می‌دهد که از نظر خطای کل برآورد تابش خورشیدی، مدل R_S-M5-2 و M-H** به ترتیب کمترین و بیشترین خطای برآورد را داشته‌اند. مقادیر آماره PRMSE همچنین نشان می‌دهد که مدل درختی R_S-M5-1 در مقایسه با دیگر مدل‌های تجربی که دارای ورودی مشابه هستند، برای تبدیل داده‌های تابش فرازمینی و LST محصولات MOD11A1 به تابش خورشیدی از دقت بهتری برخوردار است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مقایسه مدل‌های تجربی هاگریوز-سامانی و محمود-هابرد که به جای استفاده از داده‌های دمای هوا از داده‌های LST محصولات MOD11A1 و MYD11A1 سنجنده مودیس به عنوان ورودی برای

- Qin, J., Chen, Z., Yang, K., Liang, S. and Tang, W. 2011. Estimation of monthly-mean daily global solar radiation based on MODIS and TRMM products. *Appl. Energy*, 88(7):2480-2489.
- Quinlan, J.R. 1986. Introduction of decision trees. *Machine Learning 1*: 81-106.
- Quinlan, J.R. 1992. Learning with continuous classes. *Proceedings of the Fifth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Hobart, Australia, 16-18 November, World Scientific, Singapore, pp. 343-348.
- Rivington M., Bellocchi G., Matthews K.B. and Buchan K. 2005. Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132: 228-243.
- Samani, Z. 2000. Estimation solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 126(4):265-267.
- Ulivieri, C., Castronovo, M.M., Francioni, R. and Cardillo, A. 1994. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. *Advances in Space Research*, 14 (3): 59-65.
- Shengpan Lin, Nathan J. Moore, Joseph P. Messina, Mark H. DeVisser, Jiaping Wu. 2012. Evaluation of estimating daily maximum and minimum air temperature with MODIS data in east Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 128-140.
- Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinky, T., Connor, S.J. 2010. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing. Environment.*, 114 (2):449-465.
- Yan, H., Zhang, J.H., Hour, Y.Y., He, Y.B. 2009. Estimation of air temperature from MODIS data in east China. *Int. J. Remote Sens.*, 30 (23): 6261-6275.
- Wan, Z. 2008. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 112 (1): 59-74.
- Wan, Z.M., Zhang, Y.L., Zhang, Q.C., and Li, Z.L. 2002. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1):163-180.
- Wan, Z. 1999. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD), Version 3.3, NASA contract NAS5-31370 (Institute for Computational Earth System Science).
- NIR-SWIR به منظور تخمین نگهداشت آب در خاک. *مجله حفاظت منابع آب و خاک*, ۲ (۳): ۲۷-۴۲.
- سیمایی، ا.، همایی، م. و نوروزی، ع. ا. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل SEBAL برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از اطلاعات سنجنده‌های TM و MODIS. *مجله حفاظت منابع آب و خاک*, ۲ (۴): ۲۹-۴۰.
- مرادی، م. و رحیمی خوب، ع. ۱۳۹۱. برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از تصاویر ماهواره نوا و مدل درختی M5 برای شبکه‌های آبیاری - مطالعه موردی شبکه آبیاری قزوین. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک*, ۴ (۶۲): ۱۲۳-۱۳۶.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome, 300, 6541.
- Angstrom, A.K. 1924. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 120(50):121-126.
- Emamifar, S. Rahimikhoob, A. Noroozi, A.A. 2013. Daily mean air temperature estimation from MODIS landsurface temperature products based on M5 model tree. *International Journal of Climatology*, 33 (15):3174-3181
- Hargreaves, G. H. (1994). Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe, Dept. Paper, Dept. Biol. and Irrig. Engrg., Utah State University, Logan, Utah.
- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani, 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108: (3): 225-230.
- Maeda, E.E., D.A. Wiberg and P.K. Pellikka. 2011. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Appl. Geography*, 31: 251-258.
- Mahmood, R., and Hubbard, K.G. 2002. Effect of time of temperature observation and estimation of daily solar radiation for the Northern Great Plains, USA. *Agron. J.*, 94: 723-733.
- Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning*. 1997. Burr Ridge, IL: McGraw Hill, 45.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10:282-290
- Pal, M. and S. Deswal. 2009. M5 model tree based modelling of reference evapotranspiration. *Hydrology Process*, 23: 1437-1443.

Evaluating M5 model tree and two empirical models based on air temperature to estimate solar radiation, using LST in a semi-arid climate

Saeed Emamifar^{1*}, Ali Akbar Noroozi², Sadjjad Seyedi Hosseini³ and Azin Karimzad Anzabi⁴

1*) Ph.D. student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Corresponding author email: aftab2277@yahoo.com

2) Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran

3) B.Sc., Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran

4) B.Sc. student, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 28-08-2013

Accepted: 19-12-2013

Abstract

Solar radiation is one of the input parameters needed for simulation of processes associated with climate changes, hydrology and ecology. Proposed models to estimate this parameter because using the weather data from a spatial point, would also provide point estimations. In this study, two experimental models including Hargreaves - Samani and Mahmood - Hubbard that are based on air temperature data, with the input data of daily LST products MOD11A1 and MYD11A1 MODIS instead of air temperature, were used to estimate the solar radiation. The real data were obtained from Ahwaz synoptic station for 2006 and 2007. Validation results indicated that Hargreaves - Samani input MOD11A1 LST product and the model of Mahmood - Hubbard MYD11A1 products with input LST (Land Surface Temperature) have the larger and lowest accuracies in estimating solar radiation. Validation results were further indicated that Hargreaves - Samani input MOD11A1 LST product and the Mahmood - Hubbard input MYD11A1 LST product, respectively, have maximum and minimum accuracy in estimating solar radiation. For these models, R^2 and RMSE statistics were, respectively 0.83, 2.46 (mj m⁻² d⁻¹), 0.79 and 4.09 (mj m⁻² d⁻¹). The Hargreaves -Samani model by using M5 model tree models (RS-M5-1 and RS-M5-2) based on LST data of MOD11A1 MODIS products geographic variables were formulated and the outcomes were compared with results of experimental models. The results showed that compares Tree Model RS-M5-1 and experimental models with the same input, The M5 tree model has higher accuracy. In general, tree model RS-M5-2 with LST products MOD11A1 inputs, can estimate the maximum and actual sundial and extraterrestrial radiation more accurate than other models. For this model, the values of R^2 and NSE were estimated to be 0.87 and 0.86, respectively. The root mean square error for this was 10.24 percent.

Keywords: air temperature; MODIS; solar radiation