

ارزیابی مدل‌های تجربی در برآورد تبخیر و تعرق مرجع با داده‌های LST سنجنده مودیس در خوزستان

جلال یاراحمدی^{۱*} و علی رحیمی‌خوب^۲

^۱ کارشناس ارشد، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران و ^۲ دانشیار، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۰۵

چکیده

تبخیر و تعرق یکی از مهمترین پارامترهایی است که دانستن آن برای برآورد آب مصرفی گیاه و طراحی سیستم‌های آبیاری ضروری است. ترکیب مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق مرجع و داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای امکان بررسی تغییرات مکانی این متغیر را در سطوح گسترده و وسیع فراهم می‌کند. در این پژوهش، چهار مدل تجربی هارگریوز-سامانی و بلانی-کریدل، تورک و لینیاکر که وابسته به داده‌های دمای هوا هستند، با ورودی داده‌های روزانه LST محصولات MOD11A1 و MYD11A1 سنجنده مودیس به جای دمای هوا، برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای این منظور، داده‌های روزانه مقادیر حداکثر و حداقل روزانه دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در ایستگاه‌های هواشناسی پنج واحد از مزارع توسعه نیشکر (شعبیه-SH، امیرکبیر-AM، فارابی-FA، خزاعی-KH و غزالی-GH) برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع به‌وسیله معادله فائو-پنمن-مانتیت به‌عنوان خروجی هدف، استفاده شد. اطلاعات ایستگاه‌های شعبیه، امیرکبیر و فارابی برای واسنجی و ایستگاه‌های خزاعی و غزالی برای اعتبارسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق مرجع مدل‌های مورد بررسی با ورودی داده‌های LST سنجنده مودیس (محصولات MOD11A1 و MYD11A1) بدون استفاده از داده‌های اندازه‌گیری زمینی با دقت مناسب قابل برآورد است. در مقایسه، نتایج برآورد تبخیر و تعرق مرجع بر اساس نوع محصول دمایی مورد استفاده به‌عنوان ورودی مدل، نشان داد که واسنجی مدل‌ها با استفاده از داده‌های LST محصولات MOD11A1 نسبت به محصولات MYD11A1، از دقت بیشتری برخوردار است. مقایسه دقت برآورد مدل‌های مورد بررسی نشان داد که مدل تورک مبتنی بر داده‌های LST محصولات MOD11A1 با مقادیر آماره‌های RMSE و R^2 به ترتیب برابر ۱/۳ میلی‌متر بر روز و ۰/۸۶ نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: بلانی-کریدل، تهارگریوز-سامانی، دمای هوا، لینیاکر، ورک

مقدمه

آبی که برای تبخیر و تعرق مصرف می‌شود، از عوامل اساسی در برنامه‌ریزی برای رسیدن به محصول بیشتر است. همچنین، در طراحی و تعیین ظرفیت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، برآورد تبخیر و تعرق نقش مهمی

تبخیر و تعرق یکی از مهمترین پارامترهایی است که دانستن آن برای برآورد آب مصرفی گیاه و طراحی سیستم‌های آبیاری ضروری است. تعیین دقیق مقدار

همکاران، ۲۰۱۳). ترکیب مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق مرجع و داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای امکان بررسی تغییرات مکانی این متغیر را در سطوح گسترده و وسیع فراهم می‌کند. در این زمینه می‌توان به مطالعه Maeda و همکاران (۲۰۱۰)، اشاره کرد که در آن با استفاده از سه مدل تجربی هارگریوز-سامانی^۳، تورنت وایت^۴ و بلانی-کریدل^۵ به برآورد تبخیر و تعرق مرجع در منطقه‌ای در کنیا پرداخته است.

در این مطالعه پارامترهای دمای سطح زمین به‌دست آمده از تصاویر مودیس مربوط به ماهواره ترا^۶ به جای پارامترهای دمای هوا به‌عنوان ورودی این مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که در بین مدل‌های مورد بررسی، مدل هارگریوز-سامانی نتیجه بهتری ارائه می‌دهد و دقت ETo برآورده شده با این مدل برابر ۰/۴۷ میلی‌متر در روز بود (Maeda و همکاران، ۲۰۱۱).

Moradi و RahimiKhoob (۲۰۱۲)، از مدل درختی M5، برای تبدیل داده‌های دمای سطح زمین و تابش فرا زمینی به تبخیر و تعرق مرجع در شبکه آبیاری قزوین استفاده کردند. در این پژوهش برای برآورد دمای سطح زمین از الگوریتم روزنه مجزا Olivieri و همکاران (۱۹۹۴)، بر اساس داده‌های سنجنده AVHRR ماهواره نوآ^۷ استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل تدوینی مبتنی بر داده‌های اختصاص داده شده در مرحله آزمون، می‌تواند مقدار ETo را با ضریب تعیین، درصد جذر میانگین مربعات خطا و درصد میانگین انحراف خطا به ترتیب ۰/۸۱، ۸/۵ و ۲/۵ درصد برآورد نماید.

محصولات LST سنجنده مودیس به‌صورت روزانه با کدهای MOD11A1 مربوط به ماهواره ترا و کدهای MYD11A1 مربوط به ماهواره آکوا^۸ برای کاربران قابل استفاده است. یکی از اهداف این پژوهش ارزیابی

دارد. برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع تنها روش مستقیم، استفاده از لایسیمتر است که هزینه سنگین نصب و نگهداری، استفاده از آن را مشکل ساخته است. از این رو محققین سعی در تخمین این پارامتر در قالب روش‌های ترکیبی، آئروپنایمیک و تجربی نموده‌اند که اغلب با توجه به داده‌های هواشناسی، نتایج متفاوتی دارند.

مدل‌های تجربی مبتنی بر مشاهدات زمینی و آنالیزهای آماری در صورتی که برای یک شرایط اقلیمی یا ناحیه‌ای خاص به درستی واسنجی شوند، نتایج حاصل از آن‌ها مناسب خواهد بود (Ahmadi و Fooladmand، ۲۰۰۸، Gavilán، ۲۰۰۶). با وجود این که پایه و اساس مدل‌های آئروپنایمیک برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق، اصول اساسی بیلان انرژی و انتقال جرم بوده (مبتنی بر مفاهیم فیزیکی) و در شرایط اقلیمی متنوع دارای نتایج خوبی هستند (Villa و Nova، ۲۰۰۷، Cancela، ۲۰۰۶)، اما این مدل‌ها برای برآورد تبخیر و تعرق نیازمند تعداد داده‌های ورودی زیادی هستند. به عنوان مثال داده‌های تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد از جمله متغیرهای ورودی مورد نیاز برای برآورد تبخیر و تعرق در مدل‌های مبتنی بر مفاهیم فیزیکی، هستند که اندازه‌گیری آن‌ها به دلیل مسائل اقتصادی در نصب و نگهداری ایستگاه‌های هواشناسی، به‌طور محدود انجام می‌شود. بنابراین، پژوهش درباره مجموعه داده‌ها و روش‌های جایگزین برای برآورد تبخیر و تعرق، در مناطق با کمبود اطلاعات هواشناسی الزامی است.

مطابق مطالعات صورت گرفته، داده‌های سنجنش از دور می‌توانند به‌طور قابل قبولی پارامترهای هواشناسی، از قبیل دمای سطح زمین^۱ را از نظر مکانی و زمانی در اختیار کاربران قرار دهند (Wan، ۲۰۰۸). همچنین، مطالعات گذشته نشان داده که بین دمای سطح زمین (LST) محصولات سنجنده مودیس^۲ و دمای هوا همبستگی بالایی وجود دارد (Yan و همکاران، ۲۰۰۹؛ Vancutsem و همکاران، ۲۰۱۰؛ Shengpan و همکاران، ۲۰۱۲؛ Emamifar و

³ Hargreaves and Samani

⁴ Thornthwaite

⁵ Blaney and Criddle

⁶ Terra

⁷ Noaa

⁸ Aqua

¹ Land Surface Temperature

² Modis

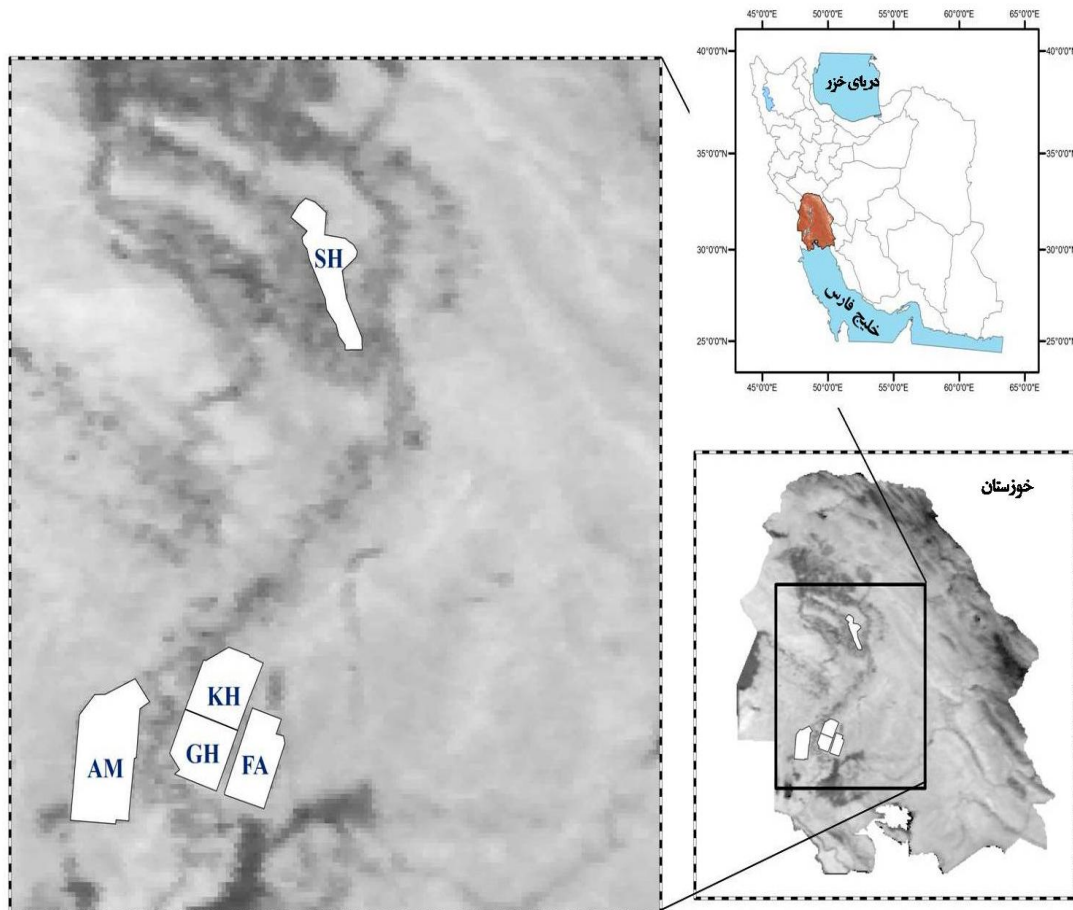
توسعه نیشکر و صنایع جانبی واقع در استان خوزستان انجام شد. استان خوزستان با وسعتی حدود ۶۳۲۳۸ کیلومتر مربع بین $38^{\circ} 47'$ تا $50^{\circ} 50'$ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و $29^{\circ} 57'$ تا 33° عرض شمالی از خط استوا در جنوب‌غربی ایران واقع شده است.

استان خوزستان از مناطق مهم کشاورزی در ایران است. متوسط درجه حرارت در طول زمستان ۹/۱۴ درجه و حداقل آن گاهی به چند درجه زیر صفر هم می‌رسد. متوسط درجه حرارت در تابستان ۳۱/۲ درجه و حداکثر آن گاهی از ۵۰ درجه نیز فراتر می‌رود. شکل ۱ موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

دقت مدل‌های تجربی بلانی-کریدل، لینیاکر، هارگریوز-سامانی و تورک بر اساس داده‌های LST محصولات دمایی سنجنده مودیس به جای دمای هوا برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع برای یکی از منطقه‌های نیمه‌خشک ایران است. مقایسه نتایج مدل‌های بالا با یکدیگر در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع یکی دیگر از اهداف این پژوهش است. همچنین، مقایسه دقت برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با مدل‌ها بر اساس نوع محصول دمایی مورد استفاده، هدف سوم این مطالعه محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: این پژوهش در مزارع طرح



شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه

حرارت و تابش برون‌زمینی است. تنها پارامتر قابل اندازه‌گیری در این روش، درجه حرارت هوا می‌باشد و تابش برون‌زمینی با استفاده از عرض جغرافیایی برای روزهای مختلف سال در منطقه مورد نظر تعیین

مدل‌های تجربی تبخیر و تعرق مرجع

معادله هارگریوز-سامانی (HS): Hargreaves و Samani (۱۹۸۵)، روش تجربی زیر را برای محاسبه تبخیر و تعرق ارائه نمودند. این روش مبتنی بر درجه

می‌شود.

نسبی روزانه (درصد) می‌باشد.

معادله لینیایر (Li): این مدل بر اساس درجه حرارت هوا توسعه یافته است. این رابطه برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع فقط نیازمند به درجه حرارت هوا می‌باشد. تبخیر و تعرق گیاه مرجع از مدل لینیایر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{700T_m}{100-A} + 15(T - T_a) \quad (7)$$

$$T_m = T + 0.006Z \quad (8)$$

$$T - T_a = 0.0023Z + 0.37T + 0.53R + 0.3R_m \quad (9)$$

که در آن‌ها، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm.d^{-1}) ، T متوسط دمای هوا $(^\circ\text{C})$ ، Z ارتفاع از سطح دریا (m) ، A عرض جغرافیایی (درجه)، R حداقل درجه حرارت هوا $(^\circ\text{C})$ و R_m تفاوت بین درجه حرارت در گرمترین و سردترین ماه سال $(^\circ\text{C})$ است.

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 علمی 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، مطالعه و ارزیابی تغییرات بلندمدت در دریا، خشکی و اتمسفر به‌وسیله مودیس امکان‌پذیر می‌باشد.

تصاویر مورد استفاده در این پژوهش، جزء زیرگروه 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 کانال-های ۳۱ (محدوده طول موج ۱۰/۷۸ تا ۱۱/۲۸

$$ET_0 = 0.0023R_a (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} (T_{\max} + 17.8) \quad (1)$$

که در آن، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm.d^{-1}) ، R_a تابش برون جوی (mm.d^{-1}) ، T_{\max} حداکثر دمای روزانه $(^\circ\text{C})$ و T_{\min} حداقل دمای روانه $(^\circ\text{C})$ و ضریب ۰/۰۲۳، ضریب تبدیل می‌باشد، که در این پژوهش برای منطقه مورد مطالعه واسنجی شد.

معادله تورک (Tu): Turc (۱۹۶۱)، در شرایط اقلیمی اروپای غربی، روابط زیر را برای تخمین ET_0 ارائه کرد.

$$ET_0 = 0.13 \frac{T}{T+15} (R_s + 2.09) \quad RH \geq 50 \quad (2)$$

$$ET_0 = 0.13 \frac{T}{T+15} (R_s + 2.09) \left[1 + \frac{50+RH}{70} \right] \quad (3)$$

$$RH \leq 50$$

که در آن‌ها، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm.d^{-1}) ، T متوسط دمای هوا $(^\circ\text{C})$ و R_s تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین $(\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1})$ می‌باشد.

معادله بلانی-کریدل (BC): مدل ارائه شده توسط Criddle و Blaney (۱۹۶۲)، به‌صورت زیر می‌باشد که در مناطق خشک غربی ایالات متحده و سایر نقاط به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. با وجود این‌که این روش در چند دهه گذشته توسعه یافته است، ولی هنوز در بسیاری از مطالعات منابع آب از آن استفاده می‌شود (Ahmadi و Fooladmand، ۲۰۰۹).

$$ET_0 = a + b [P(0.46T + 8.13)] \quad (4)$$

$$a = 0.0043RH_{\min} - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (5)$$

$$b = 0.82 - 0.0041RH_{\min} + 1.07 \left(\frac{n}{N} \right) \quad (6)$$

$$+ 0.066D_{\text{day}} - 0.006RH_{\min} U_{\text{day}}$$

که در آن‌ها، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm.d^{-1}) ، P ضریب درصد سالانه تابش آفتاب در ماه برای عرض‌های جغرافیایی مختلف (متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در ۱۰۰) و T_{mean} متوسط دمای هوا $(^\circ\text{C})$ می‌باشد. n ساعات آفتابی واقعی، N حداکثر ساعات آفتابی، U_{day} سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری (m.s^{-1}) و RH_{\min} حداقل رطوبت

اعتبارسنجی معادلات تجربی استفاده شد. تحقیقات کارشناسان سازمان فائو نشان داد که معادله تبخیر و تعرق فائو-پنمن-مانتیت که مبتنی بر مفاهیم فیزیکی است، دارای نتایج دقیق در تخمین تبخیر و تعرق برای شرایط آب و هوایی مختلف بوده است (Allen و همکاران، ۲۰۰۳؛ Allen و همکاران، ۱۹۹۸؛ Gavián و همکاران، ۲۰۰۶).

از این رو با توجه به خصوصیات تعریف شده برای گیاه مرجع، این سازمان آن را به عنوان معادله استاندارد برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع (ET_o) و واسنجی معادلات ساده تبخیر و تعرق، فرموله و معرفی کرد. در مطالعات صورت گرفته در ایران نیز جهت واسنجی مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف، در صورت عدم دسترسی به داده‌های لایسیمیتری از مدل فائو-پنمن-مانتیت استفاده شده است (Ahmadzadeh-Gharegoiz و همکاران، ۲۰۱۰؛ Sayadi و همکاران، ۲۰۰۹؛ RahimiKhoob، ۲۰۰۸).

این معادله به صورت زیر می‌باشد.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[900/(T + 273)]U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (10)$$

که در آن، ET_o تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm.d⁻¹)، U₂ سرعت باد در ارتفاع دو متری (m.s⁻¹)، T دمای هوا (°C)، R_n شار تابش خالص در سطح زمین (MJ.m⁻².d⁻¹)، (e_s - e_a) کمبود فشار بخار اشباع هوا (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع با دما (kPa.°C⁻¹) و γ ثابت سائیکرومتر (kPa.°C⁻¹) می‌باشند. در تدوین معادله فوق، فرض شده که گیاه چمن در یک سطح وسیع و متراکم کشت شده و ارتفاع چمن به طور یکنواخت ۰/۱۲ متر و کاملاً بر سطح زمین سایه انداخته است و بدون کمبود آب، تبخیر و تعرق می‌نماید. با توجه به این فرضیات، جریان افقی هوا و شار روزانه گرمای خاک ناچیز و از آن‌ها صرف نظر شده است.

برای تعیین (e_s - e_a)، Δ، R_n و γ از روابط توصیه شده توسط Allen و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شده است. شار تابش خالص در سطح زمین R_n با استفاده از ساعات واقعی آفتاب روزانه، روز از سال و موقعیت جغرافیایی ایستگاه برآورد شده است. کمبود فشار بخار

میکرومتر) و ۳۲ (محدوده طول موج ۱۱/۷۷ تا ۱۲/۲۷ میکرومتر) با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا به دست آمده‌اند (Wan و همکاران، ۲۰۰۲). در مجموع ۸۳۵ تصویر سنجنده مودیس مربوط به ماهواره‌های ترا و آکوا (۴۲۸ تصویر محصول MOD11A1 سنجنده مودیس ماهواره ترا و ۴۰۷ تصویر محصول MYD11A1 سنجنده مودیس ماهواره آکوا) از طریق پایگاه اینترنتی مودیس مربوط به ناسا به آدرس <http://modis.gsfc.nasa.gov> در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ اخذ شد. صاف و بدون ابر بودن هوا، دلیل انتخاب این تصاویر بود. تغییر سیستم مختصات تصاویر از سینوسی به UTM با استفاده از ابزار 'MRT' و استخراج اطلاعات LST در محل ایستگاه‌های مورد نظر، در محیط نرم‌افزار ARCGIS9.3 به وسیله ابزار 'HAT' انجام گرفت. مقادیر LST استخراج شده از تصاویر بر حسب کلون می‌باشند و لذا، قبل از استفاده از آن‌ها به عنوان ورودی مدل‌ها، این مقادیر به واحد درجه سلسیوس تغییر داده شدند.

واسنجی و اعتبارسنجی معادلات تجربی: مطالعات

صورت گرفته نشان‌دهنده کارایی بالای مدل‌های تجربی در برآورد تبخیر و تعرق مرجع است (Gavián و همکاران، ۲۰۰۶؛ Ahmadi و Fooladmand، ۲۰۰۸). با این وجود، این مدل‌ها با توجه به طبیعت تجربی بودن آن‌ها نیاز به تطبیق و تعدیل پارامترهای موجود برای هر منطقه دارند. عملیات تطبیق پارامترها را برای هماهنگی و سازگاری پاسخ رابطه در تولید داده‌های همانند نمونه اصلی سیستم، واسنجی رابطه گویند و با هدف حداقل کردن اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده صورت می‌گیرد. همچنین، به منظور رسیدن به نتایج مورد انتظار و تعیین این‌که آیا عملکرد مدل رضایت‌بخش است یا خیر، روش‌های توسعه و بهبود ارزیابی دقت مدل ضروری است که این مرحله از آزمون به‌عنوان اعتبارسنجی شناخته می‌شود. در این پژوهش، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های لایسیمیتری، از روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان روش استاندارد برای واسنجی و

¹ MODIS Re projection Tool

² Hawth Analysis Tools

اشباع از اختلاف بین فشار بخار اشباع (e_s) و فشار بخار واقعی هوا (e_a) از روابط زیر تعیین می‌شوند.

$$e_s = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} \quad (11)$$

$$e_a = \frac{e^o(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^o(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2} \quad (12)$$

در این روابط، $e(T_{\max})$ و $e(T_{\min})$ به ترتیب فشار بخار اشباع هوا در دماهای حداکثر و حداقل است و RH_{\max} و RH_{\min} رطوبت حداکثر و حداقل روزانه می‌باشد. برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع به‌وسیله

معادله فائو-پنمن-مانتیث، مقادیر حداکثر و حداقل روزانه دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در ایستگاه‌های هواشناسی پنج واحد از مزارع توسعه نیشکر (شعبیه-SH، امیر کبیر-AM، فارابی-FA، خزاعی-KH و غزالی-GH) که هر کدام حدود ۱۵ هزار هکتار وسعت دارند، استفاده شد. اطلاعات ایستگاه‌های شعبیه، امیر کبیر و فارابی برای واسنجی و ایستگاه‌های خزاعی و غزالی برای راستی آزمایی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۱ مشخصات مکانی و هواشناسی واحدهای فوق ارائه شده است.

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد پژوهش

ایستگاه	کد	طول جغرافیایی (°E)	عرض جغرافیایی (°N)	ارتفاع (متر)	حداکثر دما (°C)	حداقل دما (°C)
امیر کبیر	AM	۴۸° ۱۸'	۳۱° ۰۶'	۷	۶۲/۲	-۲/۷
شعبیه	SH	۴۸° ۴۶'	۳۱° ۴۸'	۲۹	۵۷/۴	-۲/۷
خزاعی	KH	۴۸° ۳۵'	۳۱° ۰۸'	۵	۶۰/۵	-۱/۷
فارابی	FA	۴۸° ۳۵'	۳۱° ۰۱'	۷/۲	۵۶/۵	-۲/۴
غزالی	GH	۴۸° ۲۸'	۳۱° ۰۰'	۵	۵۱/۴	-۲/۵

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (16)$$

نتایج و بحث

بررسی همبستگی بین دمای سطح زمین و دمای هوا در مرحله اول این پژوهش، میزان همبستگی محصولات سنجنده مودیس، با دمای هوا بررسی شد. بر این اساس، تغییرات زمانی دمای هوا و محصولات دمای سطح زمین سنجنده مودیس برای ایستگاه خزاعی به‌عنوان نمونه، در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دمای سطح زمین و دمای هوا همبستگی خوبی با هم دارند و در این بین، همبستگی داده‌های کمینه LST_N (دمای سطح زمین برداشت شده در شب، مربوط به هر دو ماهواره ترا و آکوا) و T_{\min} در مقایسه با داده‌های بیشینه LST_D (دمای سطح زمین برداشت شده در روز، مربوط به هر دو ماهواره ترا و آکوا) و T_{\max} برای هر دو محصول دمایی سنجنده مودیس، بیشتر است.

مطالعات صورت گرفته در برآورد دمای هوا نیز به‌طور مشابه ثابت کرده‌اند که میزان همبستگی LST_N و T_{\min} در مقایسه با همبستگی LST_D و T_{\max} بیشتر

مقدار تبخیر و تعرق مرجع برای هر ایستگاه، به‌وسیله مدل‌های تجربی و با استفاده از داده‌های LST سنجنده مودیس به‌جای دمای هوا، برآورد شد. واسنجی مدل‌های مورد استفاده مطابق رابطه (۱۳) صورت گرفت (Allen و همکاران، ۱۹۹۸).

$$ET_{OC} = a \times ET_{O_{LST}} + b \quad (13)$$

که در آن، ET_{OC} نشان‌دهنده مقدار تبخیر و تعرق مرجع واسنجی شده مدل تجربی و $ET_{O_{LST}}$ نشان‌دهنده مقدار تبخیر و تعرق مرجع برآورده شده به‌وسیله مدل تجربی با ورودی داده‌های LST سنجنده مودیس، a و b ضرایب ثابت واسنجی مدل‌ها هستند.

آماره‌های ارزیابی: برای ارزیابی دقت مدل‌های تجربی واسنجی شده در برآورد تبخیر و تعرق مرجع و مقایسه نسبی آن‌ها با مقادیر برآورده شده به‌وسیله مدل فائو-پنمن-مانتیث، از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) استفاده شد.

$$R^2 = \left(\frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (14)$$

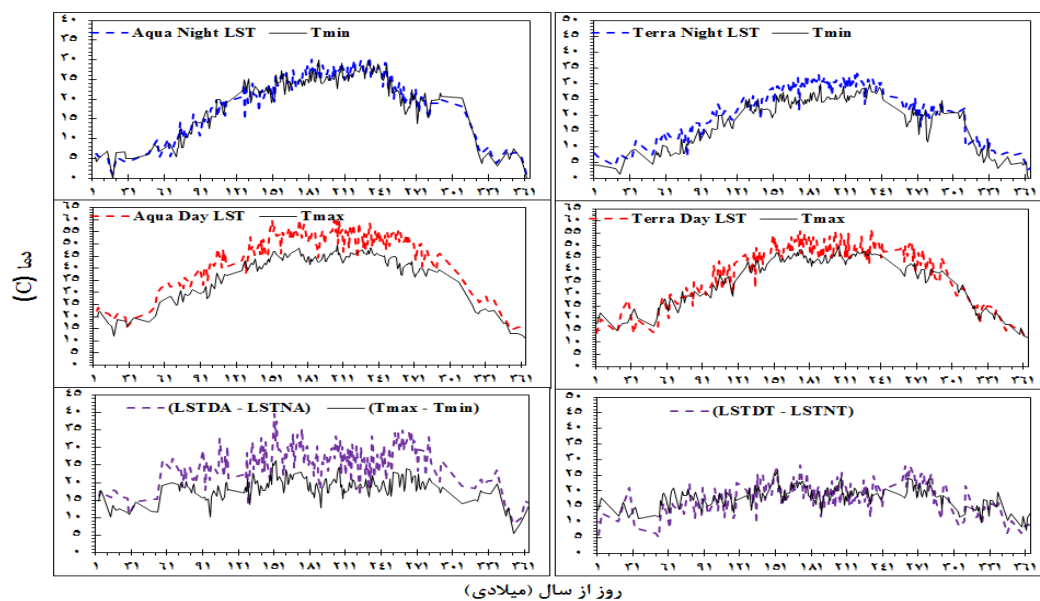
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (15)$$

به محصولات MYD11A1 دارای همبستگی بیشتری با دامنه تغییرات روزانه دمای هوا هستند که این نتیجه به‌وضوح در شکل ۲ نشان داده شده است.

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی معادلات تجربی:
نتایج آنالیز آماری مربوط به واسنجی مدل‌های تجربی با استفاده از داده‌های LST سنجنده مودیس، در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار آماره ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مدل‌های تجربی واسنجی شده با استفاده از داده‌های LST محصولات MOD11A1، از مقدار ۱/۶۴ میلی‌متر در روز برای مدل هارگریوز-سامانی تا ۳/۲۳ میلی‌متر در روز برای مدل بلانی-کریدل متغیر است. به‌طور مشابه، بررسی مقدار آماره ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مدل‌های تجربی واسنجی شده با استفاده از داده‌های LST محصولات MYD11A1، نشان‌دهنده آن است که این آماره از مقدار ۱/۶۲ میلی‌متر در روز برای مدل تورک تا مقدار ۱/۷۴ میلی‌متر در روز برای مدل هارگریوز-سامانی تغییر می‌کند. با توجه به جدول ۲، مشاهده می‌شود که بر اساس آزمون T در سطح اطمینان ۰/۹۵ ($P < 0/05$)، بین مقادیر ضرایب a و b برای هر مدل تجربی، بسته به این‌که از کدام نوع محصول LST استفاده شود، اختلاف معنی‌دار وجود دارد. بنابراین، در استفاده از این مدل‌ها باید به این نکته توجه کرد.

است (Emamifar و همکاران، ۲۰۱۳؛ Yan و همکاران، ۲۰۰۹).

شکل ۲ همچنین، نشان می‌دهد که به‌دلیل متفاوت بودن زمان گذر ماهواره‌های ترا و آکوا از منطقه مورد مطالعه، همبستگی T_{max} با LST_{DT} (مربوط به ماهواره ترا) نسبت به LST_{DA} (مربوط به ماهواره آکوا) بیشتر است، ولی نتایج در مورد دمای کمینه، بیانگر همبستگی بیشتر T_{min} با LST_{NA} در مقایسه با LST_{NT} است. زمان گذر ماهواره‌های ترا و آکوا از منطقه مورد مطالعاتی متفاوت است و به‌همین دلیل همبستگی بین داده‌های دمای هوا و محصولات مودیس در هر دو ماهواره با هم تفاوت دارد. زمان گذر ماهواره ترا در طی روز و شب، از منطقه مورد مطالعه به وقت محلی به‌ترتیب بین ساعت ۹:۳۰ الی ۱۱ و ۲۱:۳۰ الی ۲۳ و زمان گذر ماهواره آکوا به‌ترتیب بین ساعت ۱۲:۳۰ الی ۱۴ و ۰۰:۳۰ الی ۲:۰۰ می‌باشد. بنابراین، زمان گذر ماهواره ترا در مقایسه با ماهواره آکوا تطابق بیشتری با زمان وقوع دمای بیشینه دارد و عکس این موضوع در مورد دمای کمینه صادق است. بررسی‌ها همچنین، نشان می‌دهند که LST_{DT} و LST_{DA} نسبت به T_{max} بیش برآوردی دارند، در صورتی که LST_{NA} و LST_{NT} نسبت به T_{min} به‌ترتیب کم برآورد و بیش برآورد هستند. بنابراین، دامنه تغییرات روزانه دمایی محصولات MOD11A1 نسبت



شکل ۲- تغییرات زمانی محصولات دمای سطح زمین (LST) سنجنده مودیس و دمای هوا (نمودارهای سمت چپ و راست به‌ترتیب مربوط به محصولات MYD11A1 و MOD11A1 می‌باشند)

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل‌های تجربی با داده‌های LST ماهواره در مرحله واسنجی

ماهوره	آماره‌های ارزیابی	هارگریوز-سامانی	لینیاکر	بلانی-کریدل	تورک
	R ²	۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۸۱
	RMSE (mm/day)	۱/۷۴	۱/۶۷	۱/۷۰	۱/۶۲
Aqua	MBE (mm/day)	-۰/۴۰	-۰/۶۷	-۰/۰۰۲	۰/۳۵
	a	۰/۹۹۴۶	۰/۹۸۱۱	۰/۵۹۶۶	۱/۵۳۸۸
	b	۰/۰۰۶۸	۰/۷۷۹۷	۱/۴۶۹۸	-۴/۰۷۳۴
	R ²	۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۷۷	۰/۸۲
	RMSE (mm/day)	۱/۶۴	۱/۷۶	۳/۲۳	۱/۶۸
Terra	MBE(mm/day)	۰/۱۸	-۰/۷۸	۴/۶۴	۰/۳۶
	a	۰/۹۵۳	۰/۹۶۹۱	۰/۶۱۲۲	۱/۵۳۳
	b	۰/۱۳۳۶	۰/۹۵۵۸	۱/۱۲۲۵	-۴/۰۲۱۲
	P < 0.05	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**

a و b پارامترهای واسنجی مدل و ** معنی‌داری F در سطح ۰/۰۵ می‌باشند.

بر اساس مدل داده‌های LST محصولات MYD11A1 می‌توان بیان داشت که مدل تورک با بیشترین مقدار R² و مقدار کمتر RMSE نسبت به دیگر مدل‌های تجربی برتری دارد. پس از آن مدل بلانی-کریدل، لینیاکر و هارگریوز-سامانی در اولویت‌های دوم تا چهارم قرار دارند.

بررسی آماره MBE نشان می‌دهد که در بین مدل‌های تجربی واسنجی شده بر اساس داده‌های LST مودیس، مدل‌های هارگریوز-سامانی و بلانی-کریدل در برآورد تبخیر و تعرق مرجع کم برآورد و مدل‌های لینیاکر و تورک، بیش برآورد هستند. در این راستا، مدل بلانی-کریدل واسنجی شده با داده‌های LST محصولات MYD11A1 با مقدار MBE برابر ۰/۰۱- کمترین، کم برآوردی و مدل تورک واسنجی شده با داده‌های LST محصولات MOD11A1 با مقدار MBE برابر ۰/۴۲ کمترین، بیش برآوردی را دارند.

همان‌طور که گفته شد، یکی دیگر از اهداف این پژوهش مقایسه مدل‌های تجربی بسته به نوع داده LST مورد استفاده به‌عنوان ورودی، بود. در این راستا مقایسه مدل‌های مورد بررسی بر اساس جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل‌های تجربی واسنجی شده بر اساس محصولات MOD11A1 نسبت به MYD11A1 از دقت بالاتری برخوردار هستند. همچنین، با توجه به نتایج آزمون F در سطح اطمینان ۰/۹۵ (P < ۰/۰۵)، بر روی مدل‌ها مشخص شد که بین مقادیر تبخیر و تعرق

در ادامه، نتایج برآورد تبخیر و تعرق مرجع معادلات تجربی واسنجی شده، با نتایج مدل فائو-پنمن-مانتیت با استفاده از داده‌های مستقل که در واسنجی مدل‌ها استفاده نشده بودند، مقایسه شدند (مرحله راستی آزمایی). همان‌طور که گفته شد، راستی آزمایی مدل‌های واسنجی شده بر اساس ایستگاه‌های غزالی و خزایی صورت گرفت که نتایج این مرحله از آزمون در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که در بین مدل‌های تجربی مورد بررسی برای تخمین مقدار تبخیر و تعرق مرجع، مدل تورک و هارگریوز-سامانی که به ترتیب با داده‌های LST محصولات MOD11A1 و MYD11A1 واسنجی شده‌اند، به ترتیب دارای بیشترین و کمترین دقت برآورد هستند. در این راستا مقدار آماره R²، RMSE برای مدل تورک به ترتیب برابر ۰/۸۶ و ۱/۳۰ و برای مدل هارگریوز-سامانی این آماره‌ها به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۱/۹۶ است.

همچنین، در مقایسه بین مدل‌های تجربی بر اساس نوع محصول دمایی مورد استفاده به‌عنوان ورودی، می‌توان بیان داشت که در بین مدل‌های واسنجی شده بر اساس داده‌های LST محصولات MOD11A1، مدل تورک با بیشترین مقدار R² و مقدار کمتر RMSE نسبت به دیگر مدل‌های تجربی برتری دارد. پس از آن مدل بلانی-کریدل، لینیاکر و هارگریوز-سامانی در اولویت‌های دوم تا چهارم قرار دارند. در مقایسه بین مدل‌های تجربی واسنجی شده

در واقع مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه مبتنی بر دمای هوا هستند. از این رو هر چه همبستگی بین دمای و داده‌های LST سنجنده مودیس کمتر باشد، نتایج آن بیشتر تحت تاثیر این همبستگی قرار می‌گیرد.

مرجع برآورد شده به وسیله آن‌ها، بسته به این‌که از کدام نوع محصول LST استفاده شود، اختلاف معنی‌دار وجود دارد. دلیل این امر را می‌توان حساسیت مدل‌های مورد بررسی به تغییرات اختلاف دما دانست.

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل‌های تجربی با داده‌های LST در مرحله اعتبارسنجی

ماهواره	آماره‌های ارزیابی	هارگریوز-سامانی	لینیاکر	بلانی-کریدل	تورک
	R ²	۰/۶۳	۰/۷۰	۰/۷۸	۰/۸۴
Aqua	RMSE (mm/day)	۱/۹۶	۱/۸۸	۱/۴۹	۱/۳۷
	MBE (mm/day)	-۰/۱۱	۰/۴۸	-۰/۰۱	۰/۴۵
	R ²	۰/۷۴	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۶
Terra	RMSE (mm/day)	۱/۵۲	۱/۵۰	۱/۳۸	۱/۳۰
	MBE (mm/day)	-۰/۰۵	۰/۴۵	-۰/۳۵	۰/۴۲
	P < 0.05	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۶**

a و b پارامترهای واسنجی مدل و ** معنی داری F در سطح ۰/۰۵ می‌باشد.

داده‌های LST محصولات MOD11A1 نسبت به MYD11A1 بیشتر است. بررسی تغییرات زمانی تبخیر و تعرق مرجع برآورده شده با استفاده از مدل‌های تجربی واسنجی شده و مدل فائو-پنمن-مانتیت با عنوان مقدار هدف، در شکل ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق زمانی تبخیر و تعرق مرجع برآورده شده با استفاده از مدل‌های تجربی مبتنی بر محصولات MOD11A1 در مقایسه با محصولات MYD11A1، با مدل فائو-پنمن-مانتیت بیشتر است. در این راستا، روند تغییرات زمانی مقادیر برآورده شده به وسیله مدل‌های هارگریوز-سامانی مبتنی بر محصولات MYD11A1 و مدل تورک مبتنی بر محصولات MOD11A1، با مقادیر تخمینی به وسیله مدل فائو-پنمن-مانتیت در طول سال به ترتیب کمترین و بیشترین همخوانی را دارند.

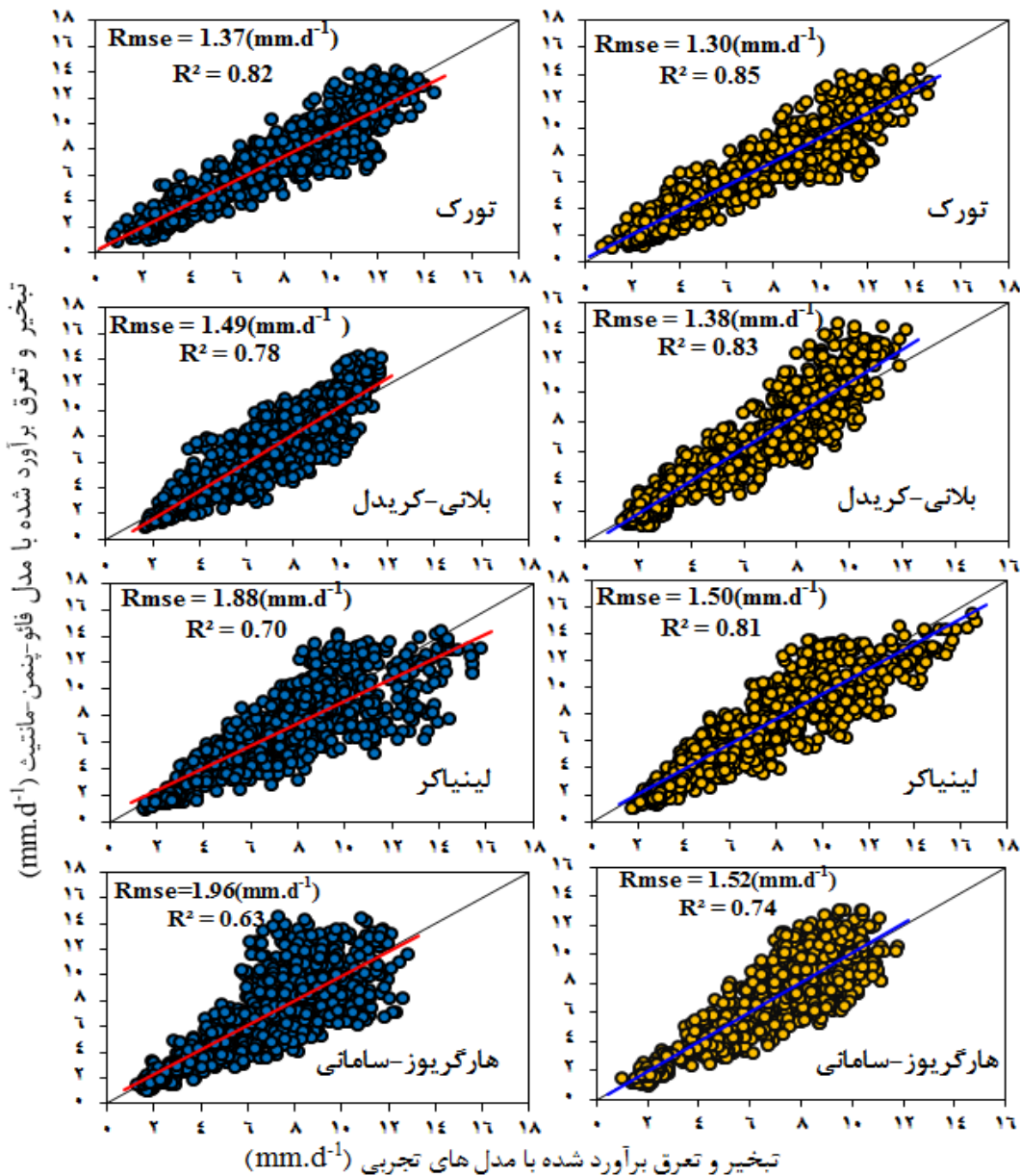
همچنین، بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد که در همه مدل‌ها تطابق زمانی تبخیر و تعرق مرجع برآورده شده با مدل فائو-پنمن-مانتیت در طی فصل زمستان بیشتر از فصل تابستان است که دلیل این امر همبستگی نزدیک داده‌های LST شب و روز مودیس با دمای هوا در طی فصل زمستان نسبت تابستان است. به عبارتی، تغییرات پوشش گیاهی در طی فصل رشد باعث کاهش همبستگی بین دمای هوا و داده‌های

به عبارتی همان‌طور که در شکل ۲ نیز نشان داده شد، اختلاف دمای داده‌های LST روز و شب محصولات MOD11A1 در مقایسه با محصولات MYD11A1 با اختلاف ماکزیمم و مینیمم روزانه دمای هوا همبستگی بیشتری دارند. بنابراین، نتایج مدل‌های مبتنی بر LST محصولات MOD11A1 کمتر تحت تاثیر اختلاف دمای هوا و LST قرار می‌گیرند و در نتیجه از دقت بالاتری برخوردارند. این نتیجه با نتایج مطالعه Maeda و همکاران (۲۰۱۰)، مبنی بر تاثیر اختلاف دمای هوا و LST، بر دقت برآورد تبخیر و تعرق مرجع به وسیله مدل‌های تجربی، هم راستا است.

نمودار پراکنش مقادیر تبخیر و تعرق مرجع برآورده شده به وسیله مدل‌های مورد بررسی در مقایسه با مقادیر استاندارد به دست آمده از روش فائو-پنمن-مانتیت در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین مدل‌های تجربی در مرحله اعتبارسنجی با مقدار این آماره در مرحله واسنجی اختلاف زیادی ندارد. بنابراین، دقت مشابه، مدل‌های واسنجی شده برای داده‌های مستقل دیگر که در واسنجی شرکت نداشته‌اند، قابل انتظار است. همچنین، ارزیابی بصری (شکل ۳) مدل‌های مورد بررسی نیز نشان می‌دهد که دقت مدل‌های مبتنی بر

در قالب شاخص‌هایی مثل شاخص NDVI و ...)
به‌عنوان یک پارامتر ورودی در واسنجی مدل‌ها مد
نظر قرار گیرد.

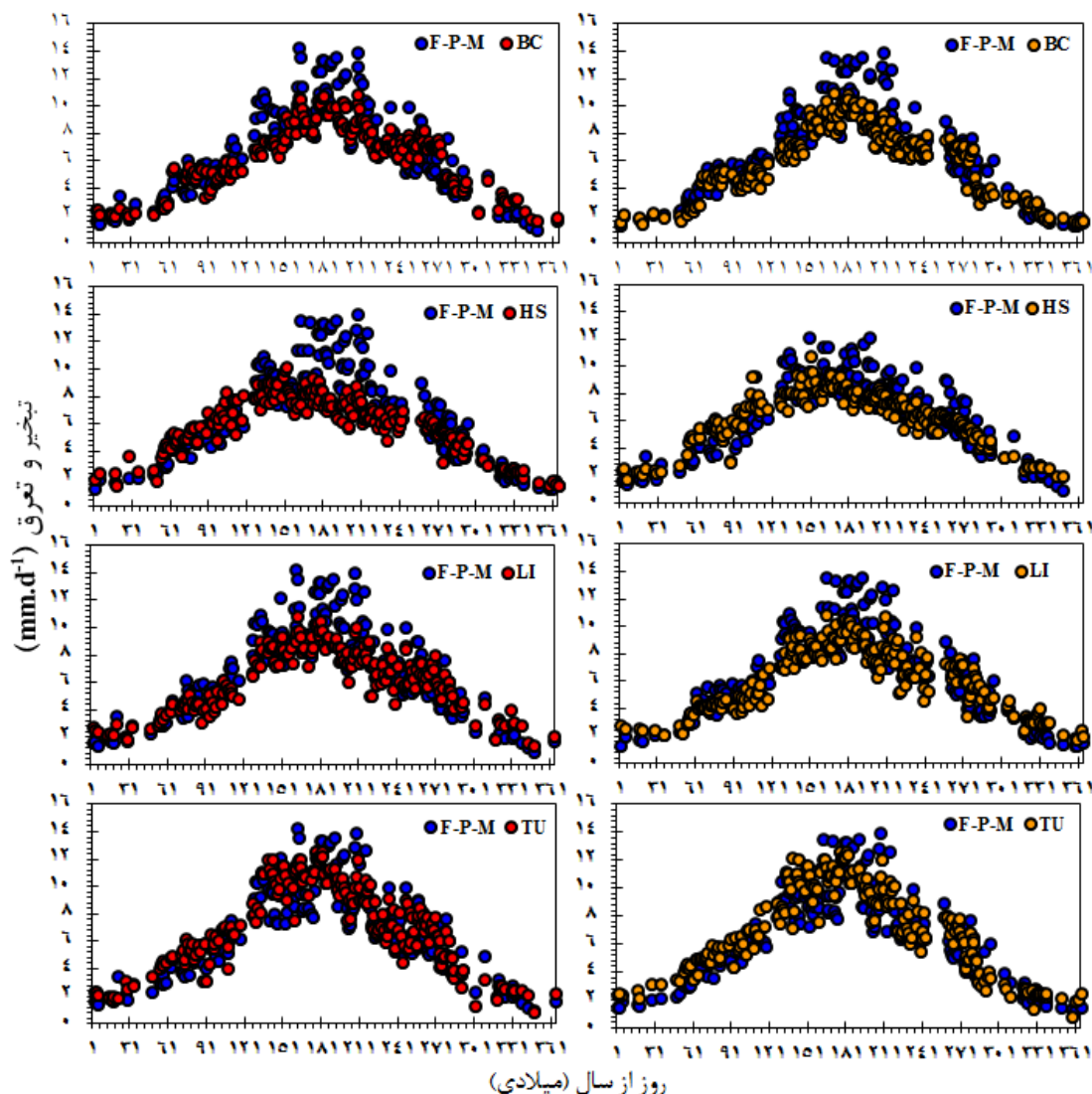
LST محصولات مودیس می‌شود. از این‌رو به‌دلیل
اهمیت تخمین دقیق‌تر تبخیر و تعرق مرجع در طی
فصل رشد پیشنهاد می‌شود که تاثیر پوشش گیاهی



شکل ۳- نمودار پراکنش مقادیر تبخیر و تعرق مرجع برآورده شده به‌وسیله مدل‌های مورد بررسی در مقایسه با مقادیر استاندارد به‌دست آمده از روش فائو-پنمن-مانتیت (نمودارهای سمت چپ مربوط به ماهواره Aqua و نمودارهای سمت راست مربوط به ماهواره Terra)

سنجنده مودیس (محصولات MOD11A1 و MYD11A1) بدون استفاده از داده‌های اندازه‌گیری زمینی با دقت مناسب قابل برآورد است و نتایج نشان داد که واسنجی مدل‌ها با استفاده از داده‌های LST محصولات MOD11A1 نسبت به محصولات MYD11A1، از دقت بیشتری برخوردار است.

در پژوهش حاضر چهار مدل تجربی برآورد تبخیر و تعرق مرجع تابع دمای هوا، با استفاده از داده‌های LST سنجنده مودیس به‌جای دمای هوا، مورد واسنجی و راستی‌آزمایی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مقدار تبخیر و تعرق مرجع برآورده شده به‌وسیله مدل‌های مورد بررسی با ورودی داده‌های LST



شکل ۴- بررسی تغییرات زمانی تبخیر و تعرق مرجع برآورده شده با استفاده از مدل‌های تجربی واسنجی شده و مدل فائو-پنمن-مانیتیت (نمودارهای سمت چپ مربوط به ماهواره Aqua و نمودارهای سمت راست مربوط به ماهواره Terra)

برخوردار است و پس از آن مدل تورک مبتنی بر داده‌های LST محصولات MYD11A1 و مدل بلانی-کریدل مبتنی بر داده‌های LST محصولات MOD11A1 با مقادیر آماره‌های R^2 و RMSE به ترتیب برابر $1/37$ میلی‌متر بر روز، $0/84$ ، $1/38$ میلی‌متر بر روز و $0/83$ در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

مدل‌های مبتنی بر داده‌های LST محصولات MOD11A1 در مقایسه با محصولات MYD11A1 دارای عملکرد بهتری هستند. مقایسه برآورد مدل‌های مورد بررسی نشان داد که مدل تورک مبتنی بر داده‌های LST محصولات MOD11A1 با مقادیر آماره‌های R^2 و RMSE به ترتیب برابر $1/3$ میلی‌متر بر روز و $0/86$ نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بیشتری

منابع مورد استفاده

- Ahmadi, S.H. and H.R. Fooladmand. 2008. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation :a case study, South of Iran. Irrigation Science, 26(4): 303-312.
- Ahmadzadeh-Gharegoiz, K., S.M. Mirlatifi and K. Mohammadi. 2010. Comparison of artificial intelligence systems in evaluation of estimation of reference evapotranspiration in Iran's dry region. Water and Soil Magazin, 24(4): 679-689 (in Persian).

3. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration eguidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, FAO.
4. Blaney, H.F. and W.D. Criddle. 1962. Determining consumptive use and irrigation water requirements. USDA Technical Bulletin 1275, Beltsville, US Department of Agriculture.
5. Cancela, J.J., T.S. Cuesta, X.X. Neira and L.S. Pereira. 2006. Modelling for improved irrigation water management in a temperate region of Northern Spain. *Biosystems Engineering*, 94(1): 151-163.
6. Emamifar, S., A. Rahimikhoob and A.A. Noroozi. 2013. Daily mean air temperature estimation from MODIS landsurface temperature products based on M5 model tree. *International Journal of Climatology*, 33(15): 3174-3181.
7. Fooladmand, H.R. and S.H. Ahmadi. 2009. Monthly spatial calibration of Blaney Criddle equation for calculating monthly ETo in south of Iran. *Irrigation and Drainage*, 58(2): 234-245.
8. Gavilán, P., I.J. Lorite, S. Tornero and J. Berengena. 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 81: 257-281.
9. Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96-99.
10. Itenfisu, D., R.L. Elliott, R.G. Allen and I.A. Walter. 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculation as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, 129(6): 440-448.
11. Maeda, E.E., D.A. Wiberg and P.K.E. Pellikka. 2010. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*, 31(2011): 251-258.
12. Moradi, M.A. and A. RahimiKhoob. 2012. Estimation of reference evapotranspiration by satellite images NOAA and M5 Tree Model for irrigation networks, case studies of Ghazvins irrigation networks. *The Agricultural Science and Technics and Natural Resources*, 16(802): 123-134 (in Persian).
13. RahimiKhoob, A. 2008. Artificial neural network estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation in a semi-arid environment. *Irrigation Science*, 27: 35-39.
14. Sayadi, H., A. Olad-Ghafari, A. Faalian, A. Ashraf-Sadredini. 2009. Comparison of RBF and MPL neural network performance in evaluation of estimation of reference evapotranspiration. *Soil and Water Science Magazine*, 19(1): 38-49 (in Persian).
15. Shengpan, L., N.J. Moore, J.P. Messina, M.H. Devisser and J. 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.
16. Turce, L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, 12(1): 13-49.
17. Ulivieri, C., M.M. Castronovo, R. Francioni and A. Cardillo. 1994. A split-window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. *Advances in Space Research*, 14(3): 59-65.
18. Vancutsem, C., P. Ceccato, T. Dinku and S.J. Connor. 2010. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 114(2): 449-465.
19. Villa Nova, N.A., A.B. Pereira and C.C. MShock. 2007. Estimation of reference evapotranspiration by an energy balance approach. *Bio Systems Engineering*, 96(4): 605-615.
20. Wan, Z., Y. Zhang, Y.Q. Zhang and Z.L. Li. 2002. Validation of the land-surface temperature products retrieved from moderate resolution imaging spectro radiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 83: 163-180.
21. Wan, Z. 2008. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 112: 59-74.
22. Yan, H., J.H. Zhang, Y.Y. Hou, Y.B. He. 2009. Estimation of air temperature from MODIS data in east China. *International Journal of Remote Sensing*, 30(23): 6261-6275.

Evaluation of empirical models in estimating reference evapotranspiration with MODIS LST data in Khuzestan

Jalal Yarahmadi^{*1} and Ali Rahimi Khoob²

¹ MSc, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran and ² Assistant Professor, College of Aburaihan, University of Tehran, Iran

Received: 25 January 2014

Accepted: 06 May 2014

Abstract

Evapotranspiration is one of the most important parameters for designing irrigation systems and estimating crop water use. Joining the models of reference evapotranspiration with the data derived from satellite images provides the opportunity for studying spatial variations of this parameter in extensive levels. In this study, four empirical models were evaluated including Hargreaves-Samani, Blaney–Criddle, Turc, and Linacre, which are dependent on temperature data for estimating reference evapotranspiration. Daily LST data obtained from MOD11A1 and MYD11A1 of MODIS were used rather than temperature data in these models. The minimum and maximum daily temperature, relative humidity, daylight hours, and wind speed were collected from weather stations located in five units of sugarcane farms (Shoaybie-SH, AmirKabir-AM, Farabi-FA, Khazaie-KH, and Ghazali-GH) in order to estimate reference evapotranspiration by Fao-Penman-Monteith equation as the target output. Calibration was done by the data of Shoaybie, Amir Kabir and, Farabi stations while the data of Khazaie and Ghazali stations were used for verification. This research showed that estimation of reference evapotranspiration can accurately be performed by LST data of Modis (MOD11A1 and MYD11A1) without direct measurements. Besides, the results revealed that use of LST data of MOD11A1 can lead to more accurate result for verification than MYD11A1. This outcome was resulted by comparing the precision measures of reference evapotranspiration based on the type of used thermal product as an input. Furthermore, comparing the precision measure of the models imply that operating the Turc model based on LST data of MOD11A1 can have more accurate results than other models (RSME and R^2 are 1.3 mm.d^{-1} and 0.86, respectively).

Key words: Blaney–Criddle, Hargreaves-Samani, Linacre, Temperature, Turc

* Corresponding author: jalal_yarahmadi@ut.ac.ir