

ارزیابی محصول تبخیر- تعرق پتانسیل از سنجنده MODIS با استفاده از آمار ایستگاه‌های همدیدی در استان زنجان

فرزانه مرادی^{۱*}، غلامعلی کمالی^۲، مجید وظیفه دوست^۳

۱. نویسنده و مسئول مکاتبات، کارشناس ارشد هواشناسی کشاورزی، دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران

۲. دانشیار گروه هواشناسی دانشگاه آزاد علوم تحقیقات تهران،

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان

چکیده

تبخیر- تعرق پتانسیل یک پارامتر مهم هواشناسی کشاورزی است و برآوردهای قابل اطمینان از تبخیر- تعرق پتانسیل برای مدیریت آبیاری، تخصیص منابع آب، مدیریت مصرف و تقاضا، طراحی و مدیریت زیرساخت‌های منابع آب و ارزیابی چرخه آب، عاملی حیاتی است. به دلیل محدودیت روش‌های ایستگاهی، تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای استخراج تبخیر-تعرق پتانسیل از تصاویر ماهواره‌ای توسعه داده شده است. هدف از این مقاله ارزیابی دقت محصول تبخیر-تعرق از تصاویر سنجنده مادیس در یک دوره آماری ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۲ بر فراز استان زنجان می-باشد. بدین منظور تبخیر-تعرق پتانسیل با گام زمانی روزانه از روش پنمن مانیتیت فائو در چهار ایستگاه سینوپتیک استان زنجان طی دوره آمار محاسبه گردید و سپس با استفاده از شاخص‌های آماری با نتایج حاصله از محصول تبخیر-تعرق سنجنده مادیس مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. کلیه عملیات آماده‌سازی و پردازش لازم بر روی تصاویر مادیس با استفاده از نرم‌افزار مطلب MATLAB صورت گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که محصول سنجنده مادیس (MOD16A2) میزان تبخیر تعرق پتانسیل را در تمامی ایستگاه‌های استان زنجان به جز ایستگاه خرم دره کمتر از میزان محاسبه شده به روش پنمن مانیتیت فائو برآورد می‌کند. بطوریکه مقدار تبخیر-تعرق در ایستگاه‌های خدابنده، زنجان و ماهنشان به ترتیب به میزان ۱۰/۱۹-، ۱۰/۵۵- و ۳/۶۸- میلی‌متر در طی هشت روز کمتر برآورد گردیده است و در ایستگاه خرمدره ETP به میزان ۰/۵۷+ بیش برآورد داشته است. همچنین ضرایب همبستگی بدست آمده از ایستگاه‌های خدابنده، خرمدره، زنجان و ماهنشان بین محصول ماهواره‌ای و تخمین ایستگاهی برابر ۰/۷۷، ۰/۷۸، ۰/۷۴ و ۰/۷۸ بود که در مجموع باتوجه به ضرایب همبستگی بالا می‌توان گفت محصول ماهواره‌ای تبخیر-تعرق در مناطق فاقد آمار قابل استفاده است.

واژگان کلیدی: تبخیر-تعرق پتانسیل، سنجش از دور، پنمن مانیتیت، فائو ۵۶، MOD16A2

مقدمه

تبخیر-تعرق یکی از اصلی‌ترین اجزاء توازن هیدرولوژیک محسوب شده و یکی از عوامل بسیار مهم در برنامه‌ریزی منابع آب محسوب می‌گردد. در مقیاس جهانی، بیش از ۶۰ درصد بارش‌ها به صورت تبخیر- تعرق دوباره به اتمسفر باز گشت می‌کند (علیزاده، ۱۳۸۱). برآوردهای قابل اطمینان تبخیر- تعرق برای مدیریت آبیاری به موقع، تخصیص منابع آب، برآورد فراهمی آب در بلند مدت، مصرف و تقاضا، طراحی و مدیریت زیرساخت‌های منابع آب و ارزیابی چرخه آب، عاملی حیاتی است.

تبخیر- تعرق به عنوان مقدار آبی که می‌تواند از یک سطح کاملاً پوشیده از گیاه بدون محدودیت آب در منطقه ریشه از طریق تبخیر- تعرق وارد اتمسفر شود، تعریف می‌شود و تخمین آن در مقیاس نقطه‌ای با روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد که می‌توان به روش‌های مستقیم (لایسیمتر) و غیر مستقیم (تشتک تبخیر، روش‌های تجربی، نیمه تجربی و فیزیکی) اشاره نمود. در روش‌های غیر مستقیم، تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه با برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_o) و ضرب آن در ضریب گیاهی تعیین می‌گردد. تاکنون روابط تجربی و نیمه تجربی متعددی به منظور تعیین تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از معادلات تجربی مبتنی بر یک یا چند پارامتر مختلف هواشناسی ارائه شده است. در روش‌های تجربی، تخمین تبخیر-تعرق با استفاده از روابط مبتنی بر پارامتر دما (بلانی کریدل^۱، ۱۹۷۰، هارگریوز و سامانی^۲، ۱۹۸۵) و یا تابش (جنسن و هیز^۳، ۱۹۶۳، پرستلی تیلور^۴، ۱۹۷۲) می‌گیرد. در روش‌های ترکیبی از ساده سازی معادلات فیزیکی بیان انرژی برای یک سطح فرضی در تخمین تبخیر-تعرق استفاده می‌گردد (پنمن^۵، ۱۹۴۸، آلن^۶ و همکاران، ۱۹۹۸). از آنجایی که روابط تجربی اغلب نیازمند واسنجی محلی بوده و کاربرد آنها در مناطق اقلیمی مختلف با محدودیت مواجه است، روش پنمن مانتیث فائو،

به عنوان تنها روش استاندارد برآورد دقیق تبخیر- تعرق مرجع از طرف سازمان خوار و بار جهانی فائو (FAO) معرفی گردید (آلن و همکاران، ۲۰۰۲، ۱۹۹۸). انجمن مهندسان عمران امریکا (ASCE)، خصوصیات ۲۰ روش مختلف تخمین تبخیر تعرق را با استفاده از داده‌های لایسیمتری در ۱۱ ایستگاه در سطح دنیا و در اقلیم‌های مختلف مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند که طی این بررسی‌ها معادله پنمن-مانتیت در تخمین روزانه و ماهانه تبخیر- تعرق مرجع در تمام اقلیم‌ها، به‌عنوان روش استاندارد شناخته شد. اما ضعف اصلی معادله پنمن-مانتیت، نیاز به داده‌های هواشناسی متعدد است که برای بسیاری از مناطق همواره در دسترس نیست. این مساله به ویژه در کشورهای در حال توسعه که داده‌های هواشناسی قابل اعتماد از رطوبت، سرعت باد و تابش به‌ندرت وجود دارد، بیشتر صدق می‌کند. همچنین بدلیل وجود تغییرات مکانی در پوشش زمین، خواص فیزیکی خاک و جریانات سطحی، اکثر پارامترهای هیدرولوژی و هواشناسی با تغییر مکان تغییرات قابل توجهی از خود نشان می‌دهند و لذا برآورد ET_o در مقایس منطقه‌ای با تعداد محدودی از مشاهدات سینوپتیکی امکان پذیر نمی باشد (باستیانسن^۷ و همکاران، ۱۹۹۷).

در مقیاس منطقه‌ای، برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش‌های جایگزین از قبیل روش‌های مبتنی بر مدل‌های توزیعی هیدرولوژیکی و اگر هیدرولوژیکی، روش فرضیه رابطه مکمل و روش‌های مبتنی بر تکنیک سنجش از دور صورت می‌پذیرد. مدل های هیدرولوژیکی و اگر هیدرولوژیکی به دلیل عدم قطعیت در پارامترهای ورودی، همواره با خطای نسبی بالا در محاسبات روبرو هستند و کاربرد این روشها عملا در حوضه‌های فاقد آمار و اطلاعات به شدت با محدودیت روبرو است. در این میان روش‌های مبتنی بر سنجش از دور در چند سال اخیر به دلیل مشاهدات پیوسته از سطح زمین توسط ماهواره‌های محیطی و هواشناسی از جایگاه ویژه‌ای در تخمین تبخیر-تعرق حتی در حوضه‌های فاقد آمار برخوردار می‌باشد. در این روشها، انرژی اندازه‌گیری شده در باندهای مرئی و حرارتی

2. Hargreaves & Samani
4. Priestley & Taylor
6. Allen et al

1. Blaney Criddle
3. Jensen and Haise
5. Penman

7. Bastiaanssen et al.

منطقه مورد مطالعه

منطقه منتخب برای مطالعه و بررسی وضعیت تبخیر تعرق گیاه مرجع، استان زنجان در شمال غرب ایران می‌باشد. در این استان هشت ایستگاه سینوپتیکی فعال می‌باشد که با در نظر گرفتن معیارهای مختلف در انتخاب ایستگاهها از جمله نبود خلا آماری، طول مدت آمارو یا دایر نبودن برخی ایستگاهها در سالهای دورتر، چهار ایستگاه خدانبده، خرمدره، زنجان و ماهنشان انتخاب شدند. در مرحله بعد با بازسازی و تطویل آمار برخی از ایستگاهها و با مینا قراردادن ایستگاه زنجان بدلیل پوشش کامل داده‌ها طی دوره آماری، دوره آماری مشترک ۱۲ ساله (۸۰-۷۹ الی ۹۱-۹۰) در نظر گرفته شد. همچنین جهت بازسازی آمار ایستگاههای ناقص از روش نسبت‌ها و تفاضل استفاده شد. شکل و جدول وضعیت پراکندگی و موقعیت و اطلاعات ایستگاههای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

به پارامترهای سطحی زمین تبدیل شده و امکان برآورد تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل در مقیاس منطقه‌ای با قدرت تفکیک مکانی مناسب و گام زمانی چند ساعت تا چند روز با هزینه و زمان کمتر قابل انجام می‌باشد (اصغرزاده و همکاران، ۱۳۸۳).

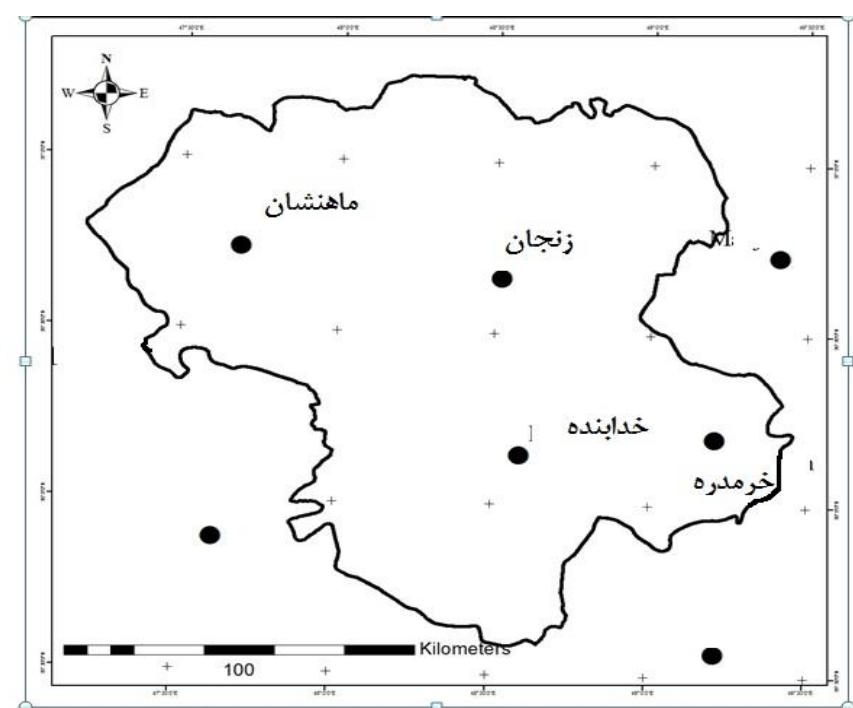
در دهه‌های گذشته برای تخمین تبخیر تعرق الگوریتم‌های مختلفی ارائه شده است (SEBS, SEBAL, METRIC, SEBI). در اکثر این الگوریتم‌ها از اصل تبادل انرژی بین اتمسفر و سطح زمین استفاده گردیده است. اگرچه در این روشها تخمین تابش خالص نسبتاً دقیق صورت می‌گیرد ولی شارهای گرمای خاک و گرمای محسوس بسیار پیچیده بوده و با چالش همراه می‌باشد و در نتیجه تخمین مقدار تبخیر-تعرق به عنوان باقیمانده بیلان انرژی در مقیاس جهانی نیز با محدودیت و عدم قطعیت روبرو است. بنابراین به منظور تخمین تبخیر-تعرق با گام زمانی مشخص و پوشش جهانی از الگوریتم‌های ساده‌تری توسعه داده شده و در تولید محصولات تبخیر تعرق MOD16 از تصاویر سنجنده مادیس (مو و همکاران، ۲۰۰۷، ۲۰۱۱) و محصول تبخیر-تعرق از سنجنده SEVIRI با عنوان EUMETSAT MSG ET (سان و همکاران، ۲۰۱۲) استفاده شده است. محصول MOD16 با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و برای دوره‌های هشت روزه، ماهانه، و سالانه قابل دسترس هستند. محصول EUMETSAT MSG ET نیز با قدرت تفکیک مکانی ۳ کیلومتر با گام زمانی سی دقیقه و روزانه قابل دسترسی است. خروجی این الگوریتم در نیمکره شمالی با استفاده از مشاهدات دقیق زمینی در سایت‌هایی که در آمریکای شمالی و جنوبی، آسیا، اروپا و استرالیا بدین منظور ایجاد شده است، واسنجی و اعتبارسنجی شده‌اند. در این مطالعه محصولات تبخیر-تعرق پتانسیل حاصل از سنجنده MODIS با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های همدیدی استان زنجان در بازه آماری ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۲ میلادی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

2. Sun et al
1. Mu et al

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های همدیدی استان زنجان

ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی		ارتفاع (متر)	دوره آماری (سال)
			درجه	دقیقه	درجه	دقیقه		
۱	زنجان	سینوپتیک اصلی	۴۸°	۳۱'	۳۶°	۳۹'	۱۶۶۳	۴۸-۹۰
۲	خرمدره	سینوپتیک اصلی	۴۹°	۱۲'	۳۶°	۱۱'	۱۵۷۵	۶۵-۹۰
۳	خداابنده	سینوپتیک اصلی	۴۸°	۳۵'	۳۶°	۸'	۱۸۸۷	۷۳-۹۰
۴	ماهانشان	سینوپتیک تکمیلی	۴۷°	۴۱'	۳۶°	۴۴'	۱۲۸۵	۷۶-۹۰



شکل ۱. موقعیت قرارگیری ایستگاه‌های همدیدی استان زنجان

تخمین تبخیر- تعرق پتانسیل

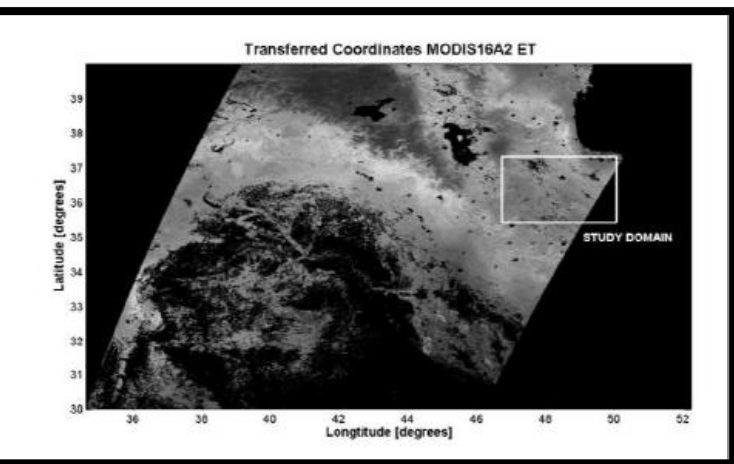
روش‌های مختلفی برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع پیشنهاد شده‌است که هر کدام از نظر پارامترهای مورد نیاز تا حدودی با یکدیگر تفاوت دارند. فائو در سال ۱۹۹۸ (نشریه ۵۶) روش ترکیبی پنمن مانیتث را به‌عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع معرفی کرد. در این مطالعه نیز به‌منظور برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع از این

روش طبق معادله (۱) استفاده شده‌است.

بر مبنای اطلاعات اقلیمی تهیه شده و با استفاده از معادله ۱، مقادیر روزانه، ماهانه و سالانه تبخیر- تعرق گیاه مرجع در هر یک از ایستگاه‌ها برآورد گردید. همچنین از روش هارگریوز جهت بازسازی و تکمیل اطلاعات و محاسبه تبخیر- تعرق روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه استفاده شد.

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

$$ET_{o-h} = 0.0023(T_{\text{mean}} + 17.8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} R_a \quad (2)$$

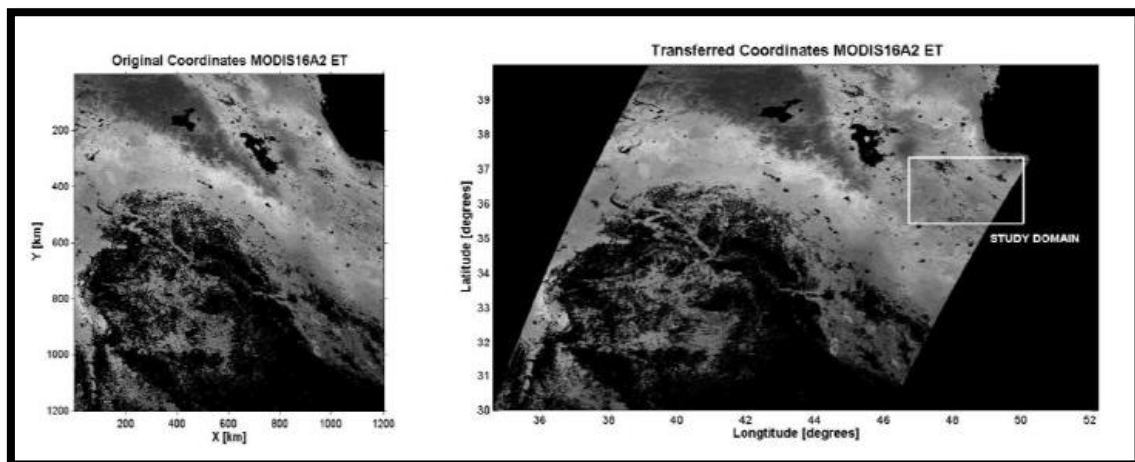


شکل نمونه‌ای از تصویر انتقال داده شده را نشان می‌دهد. نکته مهم در استفاده از ET_o خوانده شده از MOD16A2 لزوم لحاظ نمودن Scale Factor داده شده در قسمت مشخصات آن می‌باشد. این ضریب برای محصول مذکور برابر ۰/۱ می‌باشد. پس از انجام مرحله تبدیل مشخصات، محدوده استان زنجان (مربع سبز رنگ مشخص شده روی تصویر بالا) به صورت یک ماتریس درونی با ابعاد 231×401 از ماتریس بزرگ جدا شد.

تصاویر مودیس MOD16A2

در پژوهش حاضر از ۴۲۹ تصویر محصول تبخیر-تعرق پتانسیل سنجنده مودیس (Mod16A2) ماهواره ترا با دوره زمانی هشت روزه و دقت مکانی یک کیلومتر طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ میلادی (سال زراعی اکتبر تا جولای) استفاده شد. سیستم مختصات تصاویر دریافت شده پس از عملیات تغییر فرمت به منظور انطباق آنها با موقعیت ایستگاه های همدیدی صورت گرفت. محصولات مودیس با فرمت HDF^۱ می‌باشند که با مبنای قرار دادن اول ژانویه سال میلادی به عنوان مبدأ سال ژولیوسی، معیار سنجش تصاویر سنجنده مودیس روز اول مهر معادل روز دویست و شصت و ششم سال ژولیوسی و روز سی و یکم خرداد سال بعد معادل یکصد و هفتاد و دومین روز سال ژولیوسی در نرم‌افزار MATLAB مورد پردازش قرار گرفت. مقادیر ET_o در ماتریسی به ابعاد 1200×1200 برای کل زون H21V05 در سیستم مختصات جغرافیایی موجود است که به سیستم مختصات سینوسی انتقال داده شد. تابع انتقال با استفاده از انتقال تعداد مشخصی از نقاط از سیستم جغرافیایی به سینوسی در نرم افزار ERDAS به دست آمده و سپس با استفاده از کد MATLAB به سراسر محدوده H21V05 تعمیم داده شد.

ماتریس ET_o حاصله دارای ابعاد 1201×2109 و با تفکیک مکانی 0.0834028 درجه در محدوده عرض جغرافیایی 30° تا 40° درجه و طول جغرافیایی $34/64$ تا $52/22$ درجه بود.



شکل ۲. انتقال سیستم مختصات تصویر سنجنده MODIS از سیستم جغرافیایی به سینوسی
 *(منطقه مورد مطالعه در مستطیل نشان داده شده در تصویر سمت راست قرار دارد).

شاخص های آماری

برای ارزیابی روش‌های مختلف و تعیین بهترین روش جهت برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع از چهار پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا RMSE، میانگین مطلق خطا MBE، ضریب همبستگی R^2 و معیار جاکوویدز استفاده شده است که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

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

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)(MBE^2)}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (4)$$

آماره RMSE (ریشه میانگین مربعات خطاها)، با مقایسه جمله به جمله اختلاف بین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل (ماهواره) و مقادیر واقعی، معلوماتی در مورد عملکرد مدل به دست می‌دهد. هرچه مقدار RMSE کمتر باشد، نشان دهنده عملکرد بهتر مدل است و در شرایطی که مقادیر برآورد شده با مقادیر واقعی برابر باشند، مقدار آن صفر خواهد شد. این آماره در مورد کم و یا بیش برآورد کردن مدل اطلاعاتی به دست نمی‌دهد و هم بعد با پارامترهایی است که از آنها به دست می‌آید.

آماره MBE (میانگین خطای گرایش)، شاخصی از مقایسه مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی است، به طوری که مقدار نزدیک به صفر بیان کننده آن است که متوسط مقادیر برآورد شده و واقعی مشابه می‌باشند. علامت مثبت آن نشان دهنده برآورد بیشتر مدل و علامت منفی آن نشان دهنده برآورد کمتر مدل است. این پارامتر نیز هم بعد با پارامترهایی است که از آنها به دست می‌آید. با توجه به اینکه در این تحقیق موضوع مورد بررسی تبخیر- تعرق مرجع با واحد میلیمتر در روز می‌باشد، واحد آماره‌های RMSE و MBE میلیمتر در روز است. اما بدلیل اینکه اطلاعات ماهواره در دوره زمانی هشت روزه موجود بود، محاسبات ایستگاههای زمینی هم بصورت

که N تعداد نمونه، P_i مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، O_i مقادیر واقعی، \bar{P} میانگین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و \bar{O} میانگین مقادیر واقعی می‌باشند.

مجموع هشت روزه در نظر گرفته شد.

جاکویدز اعتقاد دارد که شاخص‌های RMSE و MBE به تنهایی برای انتخاب بهترین مدل تخمین ET کافی نمی‌باشد. بنا به توصیه وی، علاوه بر دو معیار فوق که به طورعموم برای مقایسه مدل‌های تبخیر - تعرق استفاده می‌شود می‌بایست از معیار سومی به نام t (معیار جاکویدز) که ترکیبی از دو معیار فوق بوده، استفاده شود، (جاکویدز، ۱۹۹۷). مقدار کمتر t جاکویدز بیانگر دقت بهتر مدل است.

با توجه به اینکه در برخی موارد ممکن است، نتایج یک مدل دارای ضریب R^2 بالا، ولی نمایه‌های (RMSE) و (MBE) و یا t قابل قبول باشند، در چنین مواردی تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل بهینه دشوار است بدین منظور، در تحقیق حاضر علاوه بر معیارهای معرفی شده توسط جاکویدز، از معیار ترکیبی جدید صباغ و همکاران که حاصل نسبت R^2 به t می‌باشد (R^2/t) نیز استفاده شد که مقادیر بالاتر آن بیانگر سازگاری بالاتر مدل با واقعیت است، (سبزی پرور و همکاران، ۱۳۸۷).

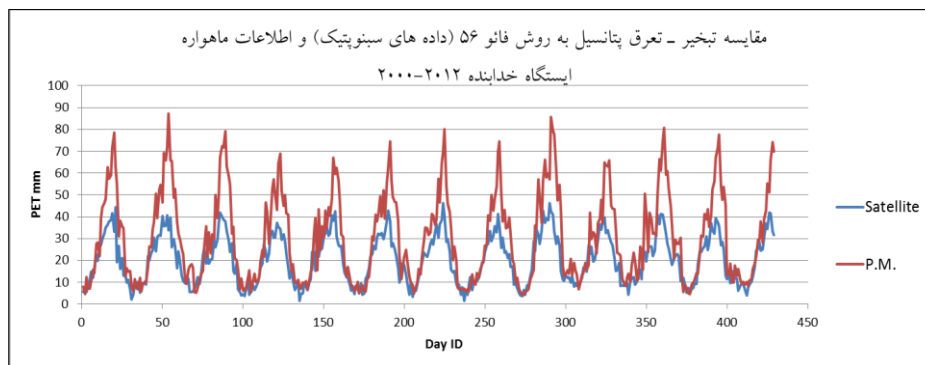
بحث و نتایج

به منظور بررسی عملکرد محصول ماهواره‌ای تبخیر-تعرق، تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن مانیتث فائو و داده‌های روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان زنجان برآورد گردید. ارزیابی دقت محصولات ماهواره‌ای تبخیر-تعرق با استفاده از معیارهای ارزیابی (ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای گرایش، ضریب همبستگی و معیار جاکویدز) مورد ارزیابی قرارگرفت. بررسی‌ها در هر ایستگاه با استفاده از مقادیر تبخیر تعرق مستخرج از ۴۲۹ تصویر مادیس با گام زمانی هشت روزه طی دوره زمانی سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ میلادی صورت گرفت. روند

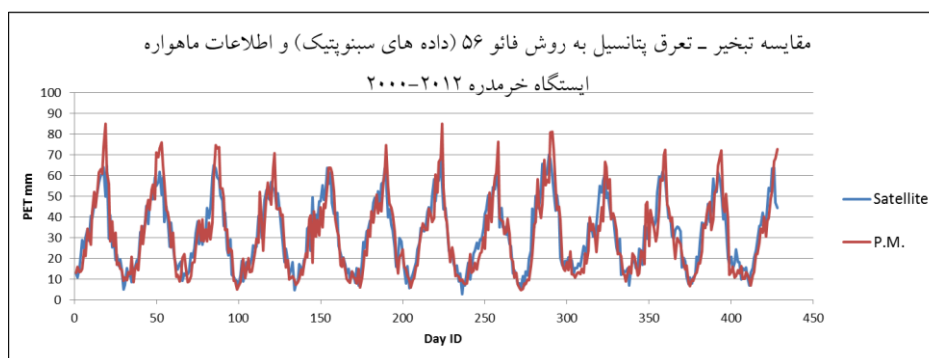
تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل حاصل از محصول MODIS و روش پنمن مانیتث در شکل‌های ۳ الی ۶ برای هر یک از ایستگاه‌های همدیدی نشان داده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که بین تبخیر-تعرق برآورد شده داده‌های ایستگاهی و خروجی‌های تبخیر-تعرق تطابق نسبی خوبی وجود داشته و هر دو از روند یکسانی پیروی می‌کند.

ارزیابی آماری

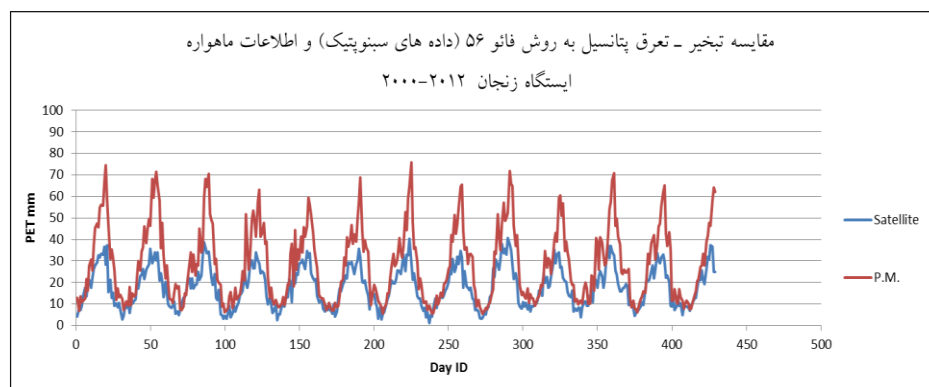
نتایج ارزیابی آماری مقایسه تبخیر-تعرق پتانسیل از داده‌های ایستگاهی (روش پنمن مانیتث فائو ۵۶) با محصول تبخیر-تعرق MODIS در جدول ۲ نشان داده شده است. در بین شاخص‌های آماری، مقادیر کم شاخص آماری RMSE نشان دهنده عملکرد مناسب مدل است. در این میان ایستگاه خرمدره با ۸/۹۳ و ایستگاه خدابنده با ۱۵/۶۵ میلیمتر اختلاف برآورد (طی دوره هشت روزه) به ترتیب دارای بهترین و بدترین عملکرد مدل بوده‌اند. همانطور که اشاره شد دلیل اینکه آماره RMSE قادر به توجیه بیش یا کم برآورد مدل نیست، لذا شاخص MBE نیز محاسبه گردید که نتایج نشان می‌دهد در سه ایستگاه خدابنده، زنجان و ماهنشان شاخص MBE منفی بوده که بیانگر کمتر برآورد کردن ماهواره نسبت به روش پنمن و با استفاده از داده‌های سینوپتیک است. اما در ایستگاه خرمدره شاخص مثبت MBE نشان‌دهنده این است که در این ایستگاه محصول ماهواره‌ای دارای خطای بیش‌برآورد می‌باشد. از نظر مقایسه کمی بهترین شرایط و کمترین خطای محصول ماهواره در ایستگاه خرمدره با ۰/۵۷+ میلیمتر به ازای دوره هشت روزه و بیشترین خطای ماهواره در ایستگاه زنجان با شاخص ۱۰/۵۵- میلیمتر در طی دوره هشت روزه رخ داده است.



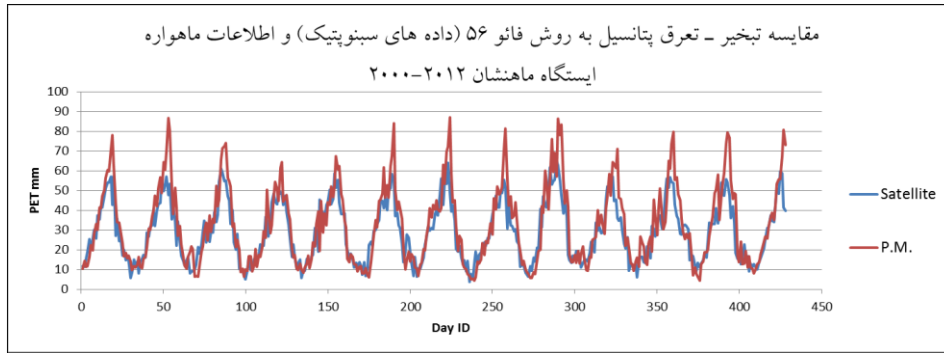
شکل ۳. مقایسه تبخیر- تعرق پتانسیل در ایستگاه سینوپتیک خدابنده (روش پتمن مانیتث فائو ۵۶) با محصول تبخیر-تعرق MODIS



شکل ۴ - مقایسه تبخیر- تعرق پتانسیل در ایستگاه سینوپتیک خرمدره (روش پتمن مانیتث فائو ۵۶) با محصول تبخیر-تعرق MODIS



شکل ۵ - مقایسه تبخیر- تعرق پتانسیل در ایستگاه سینوپتیک زنجان (روش پتمن مانیتث فائو ۵۶) با محصول تبخیر-تعرق MODIS



شکل ۶ - مقایسه تبخیر- تعرق پتانسیل در ایستگاه سینوپتیک ماهنشان (روش پتمن مانتیث فائو ۵۶) با محصول تبخیر-تعرق MODIS

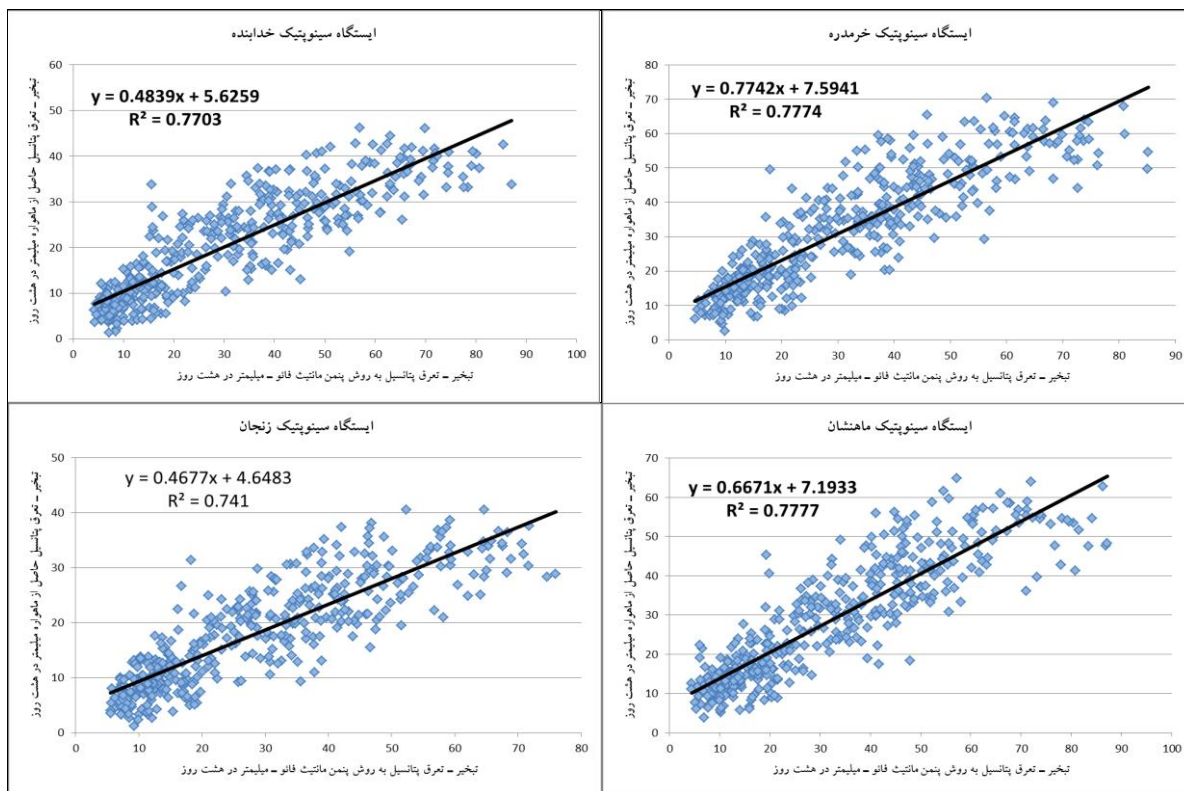
عنوان جایگزین داده‌های زمینی از داده‌های ماهواره‌ای استفاده کرد. همچنین به منظور بررسی بهتر کارایی مدل، معیار t جاکوویدز محاسبه شد که این شاخص به بررسی همزمان دو شاخص (RMSE) و (MBE) می‌پردازد که با این مقایسه نیز مجدداً ایستگاه خرمدره با داشتن کمترین مقدار t جاکوویدز یعنی $۱/۳۲$ دارای وضعیت بهتر نسبت به سایر ایستگاهها می‌باشد. نسبت ضریب همبستگی R^2 به t جاکوویدز که شاخص معیار دیگری برای بررسی کارایی مدل می‌باشد محاسبه شد و اعداد بدست آمده نشان داد که ایستگاه خرمدره با داشتن بالاترین شاخص به میزان $۰/۵۹$ نسبت به سایر ایستگاهها وضعیت بهتری داشته‌است.

همانطور که

جدول نشان داده شده است، بالاترین ضریب همبستگی بین تبخیر- تعرق پتانسیل حاصل محصول ماهواره‌ای و محاسبات زمینی، در ایستگاه ماهنشان و خدابنده با داشتن ضرایب تبیین به ترتیب $۰/۷۸$ و $۰/۷۷$ بوده‌است. پراکنش داده‌های تبخیر-تعرق حاصل از محصول ماهواره‌ای در مقایسه با روش ایستگاهی در شکل ۷ نشان داده شده است. براین اساس می‌توان ادعا کرد داده‌های MOD16A2 سنجنده مودیس ماهواره ترا در در محدوده ایستگاه ماهنشان و خدابنده از دقت بهتری برخوردار است و در صورت دسترسی نداشتن و یا فقدان داده‌های زمینی می‌توان به

جدول ۳. آماره‌های آزمون مقایسه تبخیر تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های سینوپتیک (روش پتمن مانتیث فائو ۵۶) با محصول تبخیر-تعرق MODIS

R^2/t	t	R^2	MBE Mm/8day	RMSE Mm/8day	ایستگاه	PMF-56 vs. Satellite
$۰/۰۴$	$۱۷/۷۶$	$۰/۷۷$	$-۱۰/۱۹$	$۱۵/۶۵$	خدابنده	
$۰/۵۹$	$۱/۳۲$	$۰/۷۸$	$۰/۵۷$	$۸/۹۳$	خرمدره	
$۰/۰۴$	$۲۰/۸۶$	$۰/۷۴$	$-۱۰/۵۵$	$۱۴/۸۶$	زنجان	
$۰/۱۰$	$۷/۸۱$	$۰/۷۸$	$-۳/۶۸$	$۱۰/۴۲$	ماه‌نشا ن	



شکل ۷. روابط نتایج محاسبه تبخیر و تعرق ایستگاههای زمینی (روش پتمن مانتیث فائو ۵۶) با محصول تبخیر-تعرق MODIS

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از شاخص‌های آماری، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از تصاویر ماهواره‌ای در مقایسه با روش زمینی در اکثر ایستگاه‌ها کمتر برآورد گردیده است اما از همبستگی بالایی با داده‌های ایستگاهی تبخیر-تعرق برخوردار می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، محصول ماهواره‌ای تبخیر-تعرق می‌تواند جایگزین مناسبی برای برآورد تبخیر-تعرق و اجتناب از معادلات و محاسبات پیچیده در مناطق فاقد آمار باشد.

منابع

- Allen, R.G., W.G.M. Bastiaanssen, J.L. Wright, M. Morse, Tasumi, R. Trezza, 2002, Evapotranspiration from Satellite Image for Water Management and Hydrological Balances, Proceeding of the 2002 ICID conference, Montreal, Canada, p.p1-12
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M., Smith, 1998, Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements). FAO irrigation and drainage Paper No. 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, pp.17-18
- Alizadeh, A., 2002, Principles of Applied Hydrology, Publication of Imam Reza University, Mashhad.
- Asgharzadeh, H., 2006, Estimation of evapotranspiration using data remote sensing data and GIS in Tang Kenesht basin of Kermanshah, Publication of Ferdowsi University, Mashhad.
- Bastiaanssen, W., M. Menenti, R. Feddes, A. Holtslag, 1998, A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. Journal of Hydrology, 212, 198–212.
- Bastiaanssen, W.G.M., H. Pelgrum, P. Droogers, H.A.R. de Bruin and M. Menenti, 1997, Area-average estimates of evaporation, wetness 3 indicators and top soil moisture during two golden days in EFEDA, Agronomy and Forest Meteorology, 87: 119-137.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1977; 144p.
- Jensen ME and HR, Haise, 1963, Estimation of evapotranspiration from solar radiation. Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering 89: 15-4
- Hargreaves, G. H., Z. A. Samani, 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering Agriculture, 1(2): 96–99.
- Heidarpour, M., Mousavi, S.F., Hashemi, S.A., 2007, calibration of Penman-Monteith equation to estimate the net radiation in Isfahan, Journal of agricultural science and industries specific for soil, water and air, 21 (2), pp 171-180
- Monteith, J. L., 1965. Evaporation and Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. University Press, Cambridge, 19: 205-234
- Mu, Q., F.A Heinsch. M, Zhao, S.W. Running, 2007, Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. Remote Sensing of Environment, 111, 519–536.
- Mu, Q., M. Zhao, S.W. Running, 2011, Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm, Remote Sensing of Environment 115, 1781–1800.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Soc. London Ser. A 193:120-145.
- Priestley, C. H. B., R. J. Taylor, 1972, on the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 100, 81–92
- Su, Z. 2002, The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrological Earth System Science, 6, 85–100.
- Sun, Z., M. Gebremichael, J. Ardö, A. Nickless, B. Caquet, L. Merboldh, W. Kutsch, 2012, Estimation of daily evapotranspiration over Africa using MODIS/Terra and SEVIRI/MSG data. Atmospheric Resources, 112, 35–44