

ارزیابی مکانی-زمانی داده‌های تبخیر-تعرق واقعی پایگاه‌های جهانی در حوزه آبخیز سد کرخه

جلال یاراحمدی^۱، سید مجید میرلطیفی^{۲*}، علی شمس‌الدینی^۳ و مجید دلاور^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ^۲ دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ^۳ استادیار، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران و ^۴ استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۹

چکیده

تبخیر-تعرق به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های بیلان آب، نقش مهمی در توزیع مکانی و زمانی آب در دسترس دارد. به‌دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری زمینی تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس حوضه، روش‌های مختلفی مبتنی بر اطلاعات سنجش از دور و مدل‌های هیدرولوژیکی برای برآورد این مؤلفه بیلان آب توسعه یافته است. هدف از این پژوهش، ارزیابی میزان دقت داده‌های تبخیر-تعرق واقعی مدل‌های پایگاه جهانی MOD16، MYD16 و SSEBOP برای مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی در اراضی با کاربری مختلف در شرایط سال‌های تر، خشک و نرمال در سطح حوضه بزرگ سد کرخه است. برای این منظور، ابتدا مدل هیدرولوژیکی SWAT بر مبنای اطلاعات جریان پایه و آبدهی ایستگاه‌های هیدرومتری و تغییرات حجم آبخوان‌های واقع در سطح حوضه کرخه واسنجی و اعتبارسنجی شد. پس از اطمینان از دقت عملکرد مدل، در برآورد مؤلفه‌های بیلان آب در سطح حوضه مورد مطالعه، از مقادیر تبخیر-تعرق واقعی شبیه‌سازی شده این مدل برای ارزیابی مکانی-زمانی دقت داده‌های تبخیر-تعرق واقعی مدل‌های پایگاه‌های جهانی بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که هر سه مدل، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده را با اختلاف معنی‌داری نسبت به نتایج مدل SWAT کمتر برآورد می‌کنند. به‌طوری که مقادیر RMSE و MBE به‌ترتیب از ۱۵ تا ۲۱/۷۴ و ۱۵/۹۳ تا ۸/۱۹- میلی‌متر در مقیاس ماهانه و از ۴۰/۱۷ تا ۵۹/۳۲ و ۴۷/۷۴- تا ۱۹/۳۶- میلی‌متر در مقیاس فصلی در سطح حوضه متغیر بود. هم‌خوانی بین نتایج داده‌های تبخیر-تعرق واقعی مدل‌های پایگاه‌های جهانی با مقادیر شبیه‌سازی شده مدل SWAT در سال کم بارش در مقیاسه با سال‌های پر بارش و نرمال کمتر است. اگر چه نتایج مدل SSEBOP دارای خطای کمتری در مقایسه با مقادیر خروجی مدل SWAT بود، اما روند تغییرات زمانی تبخیر-تعرق واقعی مدل‌های MOD16 و MYD16، هم‌خوانی بیشتری با سری زمانی داده‌های مدل SWAT داشت. همچنین نتایج نشان داد، در زیرحوضه‌های با کاربری غالب کشاورزی، مدل SSEBOP و در زیرحوضه‌های با کاربری جنگل و مرتع، مدل‌های MYD16 و MOD16 از خطای کمتری، برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: بیلان آب، MOD16، MYD16، SSEBOP، SWAT

مقدمه
اقتصادی کشورها است. بنابراین، برای ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب و ارائه راهکارهای مدیریتی

آب یکی از عوامل مهم در توسعه اجتماعی-

در بین روش‌های مختلف سنجش از دور، روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی که به دو دسته مدل‌های تک‌منبعی و دومنبعی تقسیم می‌شود، در پژوهش‌های گذشته بیشتر استفاده شده است. علاوه بر این، در سال‌های اخیر تعدادی از مراکز پژوهشی جهان با کمک اطلاعات به‌دست آمده از فناوری سنجش از دور، الگوریتم‌های مختلفی را توسعه و اقدام به ارائه اطلاعات در مورد تبخیر-تعرق در سراسر جهان به صورت شبکه‌ای با وضوح نسبتاً مناسب کرده‌اند. این اطلاعات عموماً از طریق داده‌های ایستگاه‌های زمینی، اطلاعات ماهواره‌ای و یا ترکیبی از هر دو حاصل می‌شود. بسیاری از مطالعات اخیر، بر ارزیابی دقت نتایج تخمین تبخیر-تعرق به‌دست آمده از روش‌های مختلف سنجش از دور و پایگاه‌های مختلف جهانی متمرکز شده است. در پژوهشی، Gao و همکاران (۲۰۰۸) به منظور ارزیابی مقادیر تبخیر-تعرق واقعی به‌دست آمده از مدل‌های تک‌منبعی^۵ SEBAL و^۶ SEBS و مدل‌های دومنبعی^۷ T-SEBS و^۸ STSEB، نتایج آن‌ها را با مقادیر تبخیر-تعرق به‌دست آمده از مدل^۹ SWAT مقایسه کردند. نتایج بیانگر این بود که در محدوده مورد مطالعه، مدل T-SEBS با داشتن خطای هشت درصد نسبت به سایر مدل‌ها که خطای آن‌ها از ۹/۶ درصد تا ۴۵ درصد گزارش شد، دقت بالاتری دارد.

همچنین، در مطالعه‌ای Ramoelo و همکاران (۲۰۱۴) اعتبارسنجی تبخیر-تعرق واقعی به‌دست آمده از مدل MOD16 را با استفاده از داده‌های سامانه اندازه‌گیری ادی کوواریانس در دو مکان واقع در یک محیط هموار و جنگلی آفریقای جنوبی، مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور، هشت روز داده‌های تجمعی تبخیر-تعرق از سامانه اندازه‌گیری ادی کوواریانس را برای تطبیق با مدل هشت روزه MOD16 در مدت ۱۰ سال از ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ محاسبه کردند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقادیر اندازه‌گیری‌شده با سامانه ادی کوواریانس در یکی از

مناسب، داشتن اطلاعات دقیق از وضعیت منابع و مصارف آب امری اجتناب‌ناپذیر است. در بیشتر سامانه‌های هیدرولوژیکی، تبخیر-تعرق یک منبع مصرف قابل توجه از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی بوده که تخمین دقیق آن، به تسهیل تصمیم‌گیری کمک می‌کند (Raz-Yaseef و همکاران، ۲۰۱۲). علاوه بر این، تبخیر-تعرق به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مؤلفه‌های بیلان آب، نقش مهمی در توزیع مکانی و زمانی آب در دسترس دارد (Melesse و همکاران، ۲۰۱۳؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۶). با این حال، برآورد دقیق تبخیر-تعرق در مقیاس بزرگ، به دلیل پیچیدگی فرایندهای حاکم بر تبخیر-تعرق و ناهمگونی در عوامل کنترل‌کننده آن، همچنان یک چالش است (Liu و همکاران، ۲۰۱۸).

روش‌های متداول اندازه‌گیری زمینی تبخیر-تعرق (لایسیمتر وزنی^۱، فن تعادل انرژی نسبت باون^۲، فن ادی کوواریانس^۳، سنتیلومتر^۴ و غیره) عمدتاً بر اساس انواع روابط و اندازه‌گیری‌های پیچیده و در مقیاس محلی در زمان اندازه‌گیری، قادر به برآورد دقیق از تبخیر-تعرق در یک محدوده همگن هستند. با این وجود، ابزار و روش‌های اندازه‌گیری زمینی، به‌طور خاص مستعد خطاهای مهم در ارتباط با نصب و واسنجی هستند (Allen و همکاران، ۲۰۱۱). به‌طوری که در مطالعات گذشته، گزارش شده که نتایج اندازه‌گیری تبخیر-تعرق به‌وسیله ابزارهای اندازه‌گیری زمینی در مقیاس وسیع می‌تواند عدم قطعیتی بین ۱۰ تا ۳۰ درصد را به همراه داشته باشد (Mue و همکاران، ۲۰۱۱؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر این، اندازه‌گیری‌های زمینی با توجه به محدودیت‌های اشاره‌شده و نیز اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای قادر به ارائه توزیع مکانی-زمانی تبخیر-تعرق نیستند. لذا، برای غلبه بر محدودیت‌های برآورد تبخیر-تعرق در مقیاس وسیع مانند حوزه‌های آبخیز، معمولاً از مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر معادله بیلان آب و مدل‌های سنجش از دور استفاده می‌شود (Long و همکاران، ۲۰۱۴).

^۵ Surface Energy Balance Algorithm for Land

^۶ Surface Energy Balance System

^۷ Two-Source Energy Balance

^۸ Simplified Two-Source Energy Balance

^۹ Soil and Water Assessment Tool

^۱ Weighing lysimeter

^۲ Bowen ratio

^۳ Eddy covariance

^۴ Scintillometer

تبيين ۰/۷۱ بیانگر همبستگی قابل قبول تبخیر-تعرق برآورد شده با مدل با داده‌های اندازه‌گیری زمینی بود. در مطالعه‌ای، Aguilar و همکاران (۲۰۱۸) عملکرد داده‌های مدل MOD16 را برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس ماهانه با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده با سامانه اندازه‌گیری ادی‌کواریانس در پنج محدوده مطالعاتی با پوشش‌های متنوع زمینی در شمال غربی مکزیک مقایسه کردند. نتایج نشان داد، ضریب تبیین از ۰/۴۵ تا ۰/۸۶، میانگین خطای انحراف (MBE) از ۰/۴۶- تا ۰/۰۴- میلی‌متر در روز و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) از ۰/۷۷ تا ۰/۳۹ میلی‌متر در روز متغیر بود. بر اساس نتایج به دست آمده، مدل MOD16 در محدوده مورد مطالعه این پژوهش در اغلب موارد مقدار تبخیر-تعرق را کمتر برآورد کرد. در مطالعه‌ای دیگر، Jongjin و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله سامانه ادی‌کواریانس مقادیر تبخیر-تعرق به دست آمده از مدل‌های GLEAM، GLDAS و MOD16 را در دو سایت مطالعاتی واقع در کشور کره جنوبی بررسی کردند و همبستگی و تحلیل عدم قطعیت آن‌ها را با استفاده از روش همبستگی سه گانه انجام دادند. نتایج نشان داد، در مقیاس ماهانه در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی به ترتیب مدل‌های GLEAM، GLDAS و MOD16 با ضریب تبیین ۰/۹۲، ۰/۹۰ و ۰/۵۸ بیشترین همبستگی را دارند. همچنین، De Paula و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی عملکرد داده‌های تبخیر-تعرق واقعی مدل SSEBOP را با مقادیر اندازه‌گیری شده سامانه اندازه‌گیری نسبت باون مقایسه کردند. نتایج آن‌ها بیانگر همبستگی مناسب میان مقادیر تبخیر-تعرق واقعی به دست آمده از مدل SSEBOP و داده‌های اندازه‌گیری زمینی بود، به طوری که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای انحراف (MBE) آن به ترتیب ۰/۶۰ و ۰/۴۰ میلی‌متر در روز بود.

بر اساس آنچه مطرح شد، داده‌های تبخیر-تعرق واقعی مدل‌های پایگاه‌های جهانی بسته به مقیاس زمانی-مکانی مختلف و شرایط اقلیمی، دارای نتایج متفاوتی خواهد بود. از سویی، با وجود مطالعات

مناطق مورد مطالعه در مقایسه با مقادیر MOD16 مدل متفاوت هست. به طوری که ضریب همبستگی آن ۰/۲۳ بود. این تفاوت ممکن است، به سبب تفاوت در پوشش گیاهی و نوع کاربری اراضی باشد.

در پژوهشی، Abiodun و همکاران (۲۰۱۷) به منظور ارزیابی دقت مجموعه داده‌های تبخیر-تعرق به دست آمده از مدل MOD16 نتایج را با تبخیر-تعرق برآورد شده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در شش حوضه در جنوب استرالیا مقایسه کرده و گزارش کردند که تفاوت در برآوردهای این دو مدل از نه تا ۳۱ درصد با توجه به مقیاس مکانی متفاوت است. همچنین، در مطالعه‌ای، Reitz و همکاران (۲۰۱۷) مقادیر تبخیر-تعرق به دست آمده از مدل SSEBOP را با داده‌های بیلان آب ترکیب کرده و نتایج مقادیر تبخیر-تعرق به دست آمده از مدل ترکیبی جدید، مدل SSEBOP و MOD16 را برای سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ با مقادیر اندازه‌گیری شده به وسیله برج‌های اندازه‌گیری شار به عنوان داده‌های مشاهداتی، در حوضه مورد مطالعه مقایسه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مدل ترکیبی جدید با ضریب تبیین ۰/۴۴ در مقایسه با مدل SSEBOP و MOD16 با ضریب تبیین به ترتیب ۰/۴۱ و ۰/۳۵ به نسبت از عملکرد بهتری برخوردار است.

در بررسی دیگر، Mianabadi و همکاران (۲۰۱۶) در حوضه نیشابور-رخ نتایج الگوریتم SEBAL را با نتایج به دست آمده از مدل SWAT مقایسه کردند. نتایج نشان داد، در صورت استفاده از روش خودکار برای انتخاب پیکسل سرد و گرم، نتایج به دست آمده از الگوریتم SEBAL در مقیاس سالانه و کل حوضه قابل قبول هست. اما در مقیاس‌های کوچک‌تر مکانی (واحدهای هیدرولوژیکی) و زمانی (ماهانه) نتایج این دو با یکدیگر همبستگی قابل قبولی ندارند. همچنین، Sharm و همکاران (۲۰۱۸) به منظور برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای، برای یک محدوده مطالعاتی مرطوب در شمال هند، داده‌های مدل SSEBOP را مورد استفاده قرار دادند. مقادیر تبخیر-تعرق به دست آمده از مدل در مقیاس ماهانه با داده‌های متناظر اندازه‌گیری شده با سامانه اندازه‌گیری ادی‌کواریانس مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج با ضریب

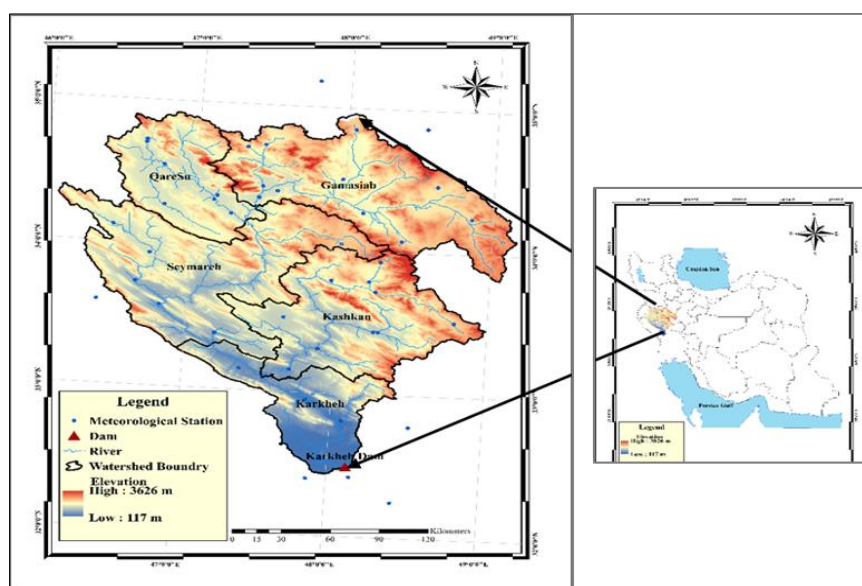
حوضه شامل مناطقی از استان‌های لرستان، همدان، کرمانشاه، ایلام و خوزستان است. زیرحوضه اصلی آن قره‌سو، گاماسیاب، سیمره، کشکان و کرخه است. میانگین بارش حوضه از ۱۵۰ میلی‌متر در نواحی جنوبی تا ۱۰۰۰ میلی‌متر در نواحی شمال شرقی حوضه متغیر است. شکل ۱، نمایی از محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

داده‌های تبخیر-تعرق برآورد شده با مدل‌های پایگاه‌های جهانی، مدل SSEBOP: این مدل به‌وسیله سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) بر اساس الگوریتم عملیاتی تعادل انرژی سطحی ساده‌شده، توسعه داده شده که جزئی از پروژه‌ای با عنوان ارزیابی شرایط زیست‌محیطی (EWEM) است. الگوریتم این مدل برای تعیین تبخیر-تعرق واقعی از تلفیق داده‌های دمای سطح زمین به‌دست آمده از داده‌های سنجنش از دور (ماهواره‌های Terra، Aqua، NOAA و Landsat) برای لحاظ کردن تبخیر از سطح خاک در تبخیر-تعرق به‌دست آمده از معادله Penman Monteith استفاده می‌کند. قدرت تفکیک مکانی این مدل‌ها یک کیلومتر است و داده‌های آن با دوره‌های زمانی ۱۰ روزه و ماهانه از طریق تارنمای سازمان زمین‌شناسی آمریکا (<http://Eaerly.warner.usgs.gov>) در فرمت tif در دسترس کاربران است (Hofste, 2014).

متعددی که در سراسر دنیا برای ارزیابی داده‌های این مدل‌ها انجام شده، تا کنون در کشور مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی داده‌های تبخیر-تعرق این مدل‌ها در سطح یک حوضه وسیع انجام نشده است. لذا، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی میزان دقت داده‌های تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده با مدل‌های SSEBOP، MOD16 و MYD16 برای مقیاس‌های زمانی مختلف ماهانه و فصلی در شرایط سال‌های تر، خشک و نرمال، در سطح حوضه بزرگ سد کرخه است. همچنین، با توجه به این‌که حوضه یادشده دارای وسعت زیادی هست و تنوع زیادی از نظر کاربری در سطح حوضه وجود دارد، بررسی میزان دقت تبخیر-تعرق واقعی این مدل‌ها، در کاربری‌های مختلف در سطح حوضه مورد مطالعه یکی دیگر از اهداف پژوهش حاضر است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: حوزه آبخیز سد کرخه در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس قرار دارد. این حوضه از نظر مختصات جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی ۵۷° ۴۶' تا ۱۰۱° ۴۹' و عرض شمالی ۳۰° ۳۱' تا ۳۵° ۳۰' قرار گرفته است. مساحت این حوضه حدود ۴۲۵۹۴ کیلومتر مربع است که ۵۵ درصد آن را مناطق کوهستانی و ۴۵ درصد آن را دشت‌ها و کوه‌پایه‌ها تشکیل می‌دهند. این



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

به منظور دستیابی به مقادیر با دقت مناسب از تبخیر- تعرق واقعی حوزه آبخیز، شبیه‌سازی مدل برای یک دوره ۳۰ ساله بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ انجام شد. بر این اساس، پنج سال اول دوره به‌عنوان گرم‌کردن مدل^۱ در نظر گرفته شد. واسنجی مدل برای دوره ۱۵ ساله اول (۱۹۹۰ الی ۲۰۰۵) صورت گرفت و ۱۰ سال انتهایی دوره (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵) نیز برای اعتبارسنجی عملکرد مدل استفاده شد.

پس از تهیه پیکره‌بندی حوضه در مدل، واحدهای همگن هیدرولوژیکی با استفاده از برهم‌نهی^۲ نقشه‌های DEM، خاک و کاربری اراضی استخراج و با توجه به آن‌ها داده‌های هواشناسی، مصارف، بهره‌برداری از سدها، نحوه مدیریت زراعی و همچنین، پارامترهای مورد نیاز در بخش‌های مختلف اعم از آب زیرزمینی، مخزن، برف در مدل اعمال شد. پس از تنظیم اولیه مدل، به منظور اطمینان از عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان‌ات سطحی و آب زیرزمینی و اندرکنش آن‌ها، واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های دبی رودخانه‌ها، دبی پایه و تراز آب زیرزمینی، انجام شد. بر این اساس، برای واسنجی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری در سطح حوضه از الگوریتم واسنجی SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. از آنجا که در سطح حوضه مورد مطالعه، داده اندازه‌گیری‌شده تبخیر-تعرق واقعی موجود نیست، در این پژوهش، با در نظر گرفتن مقادیر کل بارش سالانه در سطح حوضه که در شکل ۲ نشان داده شده، سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱ به ترتیب به‌عنوان سال‌های پربارش، کم‌بارش و نرمال انتخاب شد و دقت داده‌های تبخیر-تعرق واقعی مدل‌های پایگاه‌های جهانی در این سال‌ها در مقایسه با تبخیر-تعرق واقعی به‌دست آمده از شبیه‌سازی مدل SWAT در سطح زیرحوضه‌های آبخیز اصلی سد کرخه مورد ارزیابی قرار گرفت.

معیارهای ارزیابی: به منظور ارزیابی دقت تبخیر-تعرق واقعی حاصل از مدل‌های مورد بررسی بر پایه خروجی‌های مدل هیدرولوژیکی SWAT، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات

مدل MOD16 و MYD16: در الگوریتم توسعه داده شده برای تولید داده‌های تبخیر-تعرق مدل MOD16، تبخیر از سطح زمین از سه منبع شامل تعرق از گیاه، تبخیر از سطح مرطوب گیاه و تبخیر از سطح خاک در نظر گرفته شده است. در محاسبه این سه جزء از معادله اصلاح‌شده Penman Monteith با استفاده از داده‌های ماهواره Terra استفاده شده است. قدرت تفکیک مکانی این مدل یک کیلومتر و اطلاعات آن در بازه‌های زمانی هشت روزه و سالانه با فرمت hdf از طریق تارنمای سازمان ملی هوا و فضای آمریکا (NASA) در دسترس کاربران قرار دارد (Abiodun و همکاران ۲۰۱۸). الگوریتم و رویکرد تولید مدل MYD16 مشابه مدل MOD16 بوده، با این تفاوت که در تولید این مدل از داده‌های ماهواره Aqua استفاده می‌شود. تصاویر اخذ شده با استفاده از ابزار MRT در بستر نرم‌افزار ENVI از سامانه مختصات سینوسی به سامانه مختصات جغرافیایی تبدیل شد. با توجه به بزرگ‌بودن وسعت حوضه مورد مطالعه و قرار گرفتن در دو تصویر، این تصاویر با استفاده از ابزارهای نرم‌افزار ARCGIS10.4 موزاییک شد. سپس مقادیر تبخیر-تعرق برای هر یک از زیرحوضه‌ها با استفاده از ابزار (ZONAL) در نرم‌افزار ARCGIS10.4 استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفت.

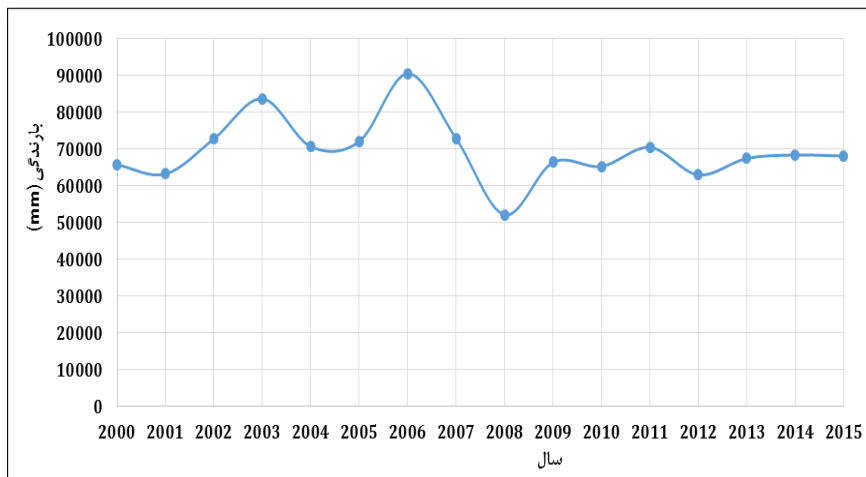
مدل SWAT: مدل SWAT با توجه به گستردگی معادلات حاکم بر آن یکی از قوی‌ترین و پیچیده‌ترین مدل‌های هیدرولوژیکی به شمار می‌آید. در عین حال، نتایج پروژه‌های متعدد در سطح بین‌المللی نشان داده که این مدل از دقت بالایی در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب برخوردار است. این مدل بر پایه و اساسی فیزیکی، نیمه‌توزیعی، در مقیاس حوضه، برای زمان پیوسته و تاکید بر فرایندهای سطح خاک از سال ۱۹۹۸ تا سال ۲۰۱۲ در اداره تحقیقات کشاورزی آمریکا (USDA-ARS) توسعه یافته است (Neitsch و همکاران، ۲۰۱۹). در پژوهش حاضر، برای آماده‌سازی مدل SWAT، به منظور تطابق بیشتر با شرایط واقعی و مدیریت فعلی حوضه، پیکره‌بندی مدل با استفاده از نقشه‌های DEM و همچنین، با توجه به موقعیت رودخانه‌ها، ایستگاه‌های هیدرومتری، سدها و محدوده‌های مطالعاتی صورت گرفت. همچنین،

¹ Warm-up period

² Overlay

تشخیص مدل مناسب، کافی نیست. لذا، شاخص t که از ترکیب دو شاخص RMSE و MBE به دست می‌آید، را پیشنهاد کرده است.

خطا (RMSE)، میانگین خطای انحراف (MBE) و ضریب نش‌ساتکلیف (NS) استفاده شد. Jacovides (۱۹۹۷) اعتقاد دارد که در مقایسه چند مدل با یکدیگر شاخص‌های RMSE و MBE به تنهایی برای



شکل ۲- بارندگی سالانه در سطح حوزه آبخیز کرخه برای دوره داده‌برداری (۲۰۱۵-۲۰۰۰)

اعتبارسنجی مدل SWAT به صورت جامع و حتی الامکان با توجه به پتانسیل داده‌های مشاهده شده موجود، شامل دبی پایه، آبدی ایستگاه‌های هیدرومتری و تراز آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی انجام شد. نتایج مدل برای شبیه‌سازی جریان در دوره واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از شاخص‌های آماری در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، سری زمانی دبی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی مدل واسنجی- شده در محل ایستگاه‌های آبدی به همراه باند عدم قطعیت ۹۵ درصد مقادیر شبیه‌سازی، در شکل ۳ ارائه شده است. به دلیل محدودیت حجم مقاله، تنها نمودار سری زمانی سه ایستگاه قورباغستان، پل دختر و سد کرخه ارائه شد. با توجه به قرار گرفتن مقادیر برآوردشده با مدل در باند عدم قطعیت ۹۵ درصد، می‌توان مطرح کرد، مدل توانسته با دقت قابل‌قبولی مقادیر آبدی را در ایستگاه‌های اصلی حوزه شبیه‌سازی کند. از طرفی، مقادیر شاخص‌های R^2 و NS برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی در بیشتر ایستگاه‌ها بیشتر از ۰/۵ هست که با توجه به نتایج سایر تحقیقات انجام‌شده نظیر Güll و همکاران (۲۰۱۰) و Jain و همکاران (۲۰۱۰) و همچنین

این شاخص بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف بین دقت تخمین‌های انجام‌گرفته با استفاده از مدل در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده هست. هر قدر مقدار این شاخص کمتر باشد، بیانگر دقت بالاتر نتایج مدل است. علاوه بر این، ممکن است، نتایج مدل‌های مختلف به نحوی باشد که دارای همبستگی و خطاهای نزدیک به یکدیگر باشند که این امر می‌تواند تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل برتر را حتی با وجود شاخص t دشوار کند. لذا، مطابق مطالعات گذشته، در این پژوهش، از معیار ترکیبی R^2/t نیز استفاده شد (Sabziparvar و همکاران ۲۰۰۸). مقادیر بالاتر این شاخص بیانگر سازگاری بالاتر و اختلاف کمتر نتایج مدل با مقادیر مشاهده‌اتی است. با توجه به شناخته‌شده بودن شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE، MBE و NS، تنها رابطه محاسبه t ارائه شده که در این رابطه n تعداد داده‌ها است.

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

نتایج و بحث

مدل هیدرولوژیکی SWAT: واسنجی و

آبخیز مورد مطالعه برخوردار است. البته این موضوع به معنی نفی وجود عدم قطعیت ذاتی موجود در مدل‌های هیدرولوژیکی نیست. نویسندگان با آگاهی به این مسئله با توجه به در دسترس نبودن داده‌های اندازه‌گیری‌شده در سطح حوضه‌ای به این وسعت و با توجه به گزارش دقت قابل قبول نتایج خروجی‌های مدل SWAT در مطالعات گذشته (Gao و Long، ۲۰۰۸؛ Mianabadi و همکاران، ۲۰۱۶؛ Abiodun و همکاران، ۲۰۱۷)، از مقادیر تبخیر-تعرق واقعی شبیه‌سازی شده این مدل برای ارزیابی دقت داده‌های تبخیر-تعرق واقعی مدل‌های پایگاه‌های جهانی استفاده کرده‌اند.

صحت‌سنجی داده‌های تبخیر-تعرق واقعی مدل-های پایگاه‌های جهانی در مقیاس زمانی: ارزیابی میزان دقت داده‌های تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده با مدل‌های جهانی MOD16، MYD16 و SSEBOP در مقایسه با مقادیر خروجی مدل SWAT در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱ برای مقیاس زمانی ماهانه و فصلی در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه شاخص‌های آماری در مقیاس ماهانه برای مدل‌ها در این سال‌ها متفاوت است. بر این اساس، مقدار ضریب تبیین برای مدل MOD16 از ۰/۲۸ تا ۰/۶۳ و برای مدل MYD16 از ۰/۳۱ تا ۰/۶۳ و برای مدل SSEBOP از ۰/۰۱ تا ۰/۴۹ و مقادیر RMSE برای هر کدام از مدل‌ها به ترتیب از ۱۵/۵۳ تا ۲۱/۶۴، ۱۵ تا ۲۱/۷۴ و ۱۷/۳۱ تا ۲۰/۹۱ و مقادیر MBE نیز به ترتیب از ۱۱/۵۱- تا ۱۵/۷۸-، ۱۱/۰۱- تا ۱۵/۹۳- و ۶/۴۵- تا ۹/۸۲- میلی‌متر در ماه متغیر است. در مقیاس فصلی نیز مقادیر شاخص‌های آماری برای هر سه مدل متغیر است. در این راستا، عملکرد هر سه مدل برای سال پربارش در مقایسه با سال کم‌بارش با نتایج مدل SWAT از همبستگی بالاتری در برآورد تبخیر-تعرق واقعی منطقه مورد مطالعه برخوردار است. این نتایج با نتایج گزارش‌شده به وسیله Reitz و همکاران (۲۰۱۷) مبنی بر متفاوت بودن عملکرد مدل‌ها در مقیاس زمانی و شرایط اقلیمی مختلف و همچنین، همبستگی بالاتر نتایج در سال‌های مرطوب هم‌خوانی دارد.

توصیه‌های انجام‌شده در خصوص معیارهای مناسب برای ارزیابی دقت واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی بر اساس شاخص‌های یادشده به وسیله Moriasi و همکاران (۲۰۰۷)، حاکی از واسنجی مدل با دقت قابل قبول برای حوضه‌ای با این وسعت هست. همچنین، شاخص‌های نشان‌دهنده عدم قطعیت شبیه‌سازی d-factor و p-factor نیز در بیشتر ایستگاه‌های واقع‌شده در زیرحوضه‌ها از مقادیر قابل قبولی برخوردار هستند که تأییدکننده دقت قابل قبول مقادیر شبیه‌سازی هست.

همچنین، نتایج میزان دقت بین جریان پایه جداسازی شده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به وسیله مدل SWAT در پنج زیرحوضه اصلی حوضه کرخه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج این بخش نیز نشان‌دهنده آن است که مقدار ضریب تبیین و NS برای حوضه‌های مورد بررسی به ترتیب در دامنه ۰/۷۶ الی ۰/۸ و ۰/۵۸ الی ۰/۷۶ متغیر بوده که بیانگر دقت بالای مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان پایه حوضه‌های مورد مطالعه است.

علاوه بر این، همزمان با واسنجی مدل برای جریان رودخانه‌های حوضه و اطمینان از توانایی مناسب آن در شبیه‌سازی این جریانات، واسنجی مدل به منظور برآورد مناسب تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی نیز انجام شد. مقدار شاخص‌های R^2 و NS برای واسنجی مدل بر اساس تغییرات تراز آبخوان‌های واقع در حوضه بزرگ سد کرخه به ترتیب در ۸۳ و ۸۷ درصد آبخوان‌ها بالای ۵۰ درصد است که پراکندگی میزان دقت مدل در شبیه‌سازی این مؤلفه در آبخوان‌های واقع در سطح حوضه در شکل ۴ نمایش داده شده است. بیشینه انحراف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی در حدود ۲۶ درصد است. این نتایج بیانگر عملکرد مطلوب مدل در شبیه‌سازی تغییرات حجم آبخوان‌ها در غالب محدوده‌های مطالعاتی است.

به‌طورکلی، می‌توان مطرح کرد که مدل SWAT به دلیل واسنجی مناسب مبتنی بر جریان پایه، آبدهی ایستگاه‌های هیدرومتری و هیدروگراف آبخوان‌های واقع در محدوده مطالعاتی، از دقت و قابلیت قابل قبولی در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در سطح حوضه

جدول ۱- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی دبی در ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در حوزه

ردیف	ایستگاه‌ها	p-factor	d-factor	واسنجی (۱۹۹۰-۲۰۰۵)		اعتبارسنجی (۲۰۰۶-۲۰۱۵)	
				NS	R ²	NS	R ²
۱	سرآسیاب	۰/۲۲	۰/۱۰	۰/۸۷	۰/۸۰	۰/۶۶	۰/۶۰
۲	قورباغستان	۰/۵۶	۰/۱۳	۰/۷۵	۰/۶۲	۰/۸۳	۰/۷۰
۳	حیدرآباد	۰/۶۷	۰/۲۶	۰/۷۶	۰/۷۱	۰/۶۶	۰/۶۲
۴	آران	۰/۵۴	۰/۲۰	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۵۵	۰/۵۱
۵	پل چهر	۰/۴۶	۰/۱۳	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۷۴	۰/۶۴
۶	دره تنگ	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۵۹	۰/۴۸	۰/۶۴	۰/۵۷
۷	کاکارضا	۰/۶۴	۰/۱۲	۰/۶۳	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۵۳
۸	چم انجیر	۰/۶۱	۰/۲۲	۰/۶۹	۰/۵۴	۰/۵۹	۰/۴۸
۹	آفرینه	۰/۷۵	۰/۱۶	۰/۷۸	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۵۶
۱۰	پل دختر	۰/۵۲	۰/۲۵	۰/۸۰	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۷۰
۱۱	تنگ سازین	۰/۶۷	۰/۰۷	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۵۲	۰/۱۸
۱۲	هلیلان	۰/۷۸	۰/۰۷	۰/۶۹	۰/۵۴	۰/۱۴	۰/۲۵
۱۳	چنارسوخته	۰/۵۱	۰/۲۸	۰/۷۸	۰/۷۲	۰/۶۲	۰/۱۶
۱۴	نظرآباد	۰/۶۹	۰/۱۰	۰/۷۰	۰/۵۵	۰/۶۹	۰/۶۳
۱۵	جلوگیر	۰/۶۹	۰/۳۹	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۶۹
۱۶	پل زال	۰/۶۸	۰/۳۱	۰/۷۱	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۲۱
۱۷	سد کرخه	۰/۷۶	۰/۲۱	۰/۸۶	۰/۸۱	۰/۸۷	۰/۸۷

جدول ۲- نتایج ارزیابی جریان پایه ماهانه در ایستگاه‌های منتخب زیرحوضه‌های اصلی

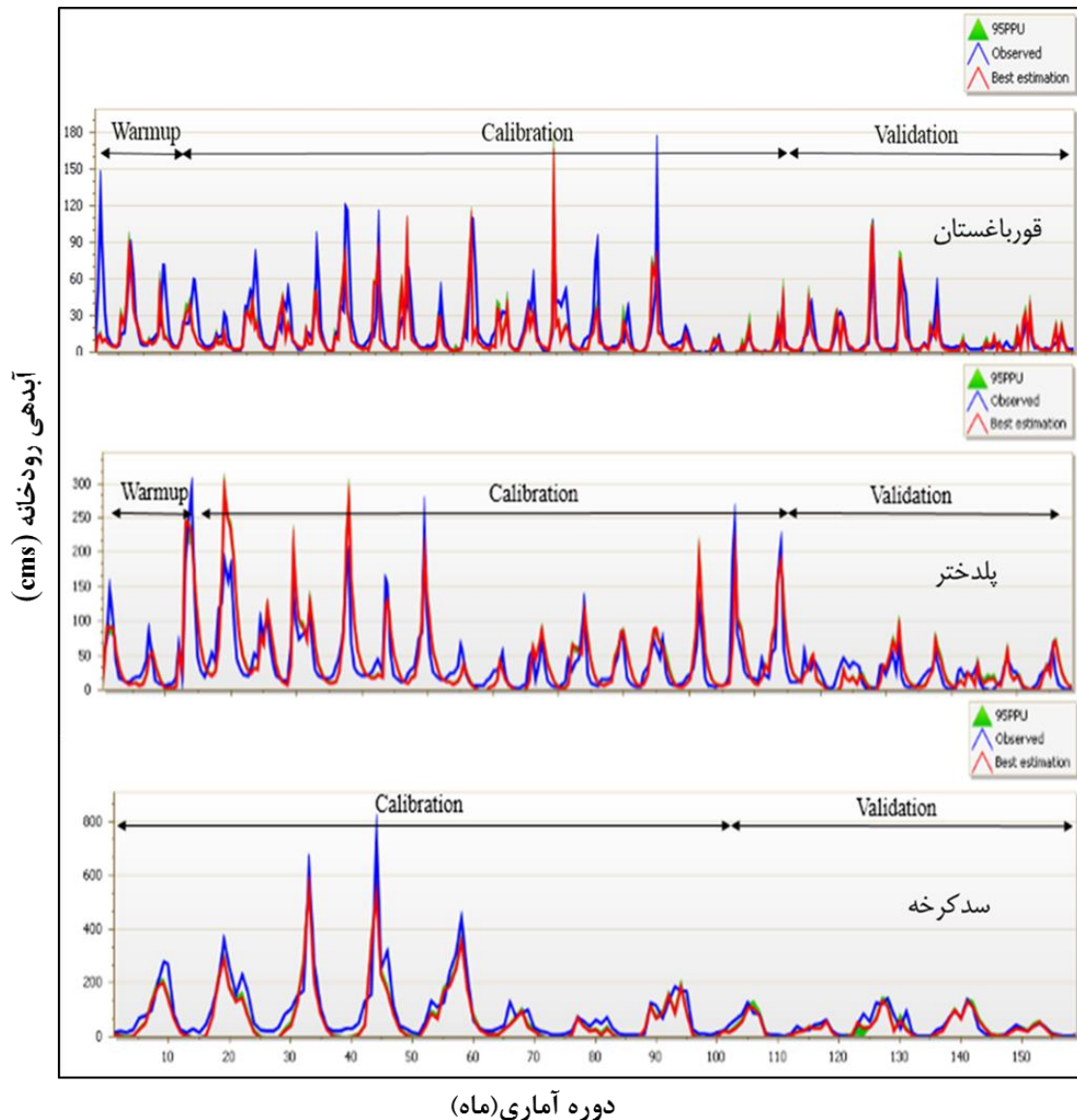
زیرحوضه	R ²	NS	RMSE (m ³ s ⁻¹)
قره‌سو	۰/۷۹	۰/۶۱	۷/۱۱
گاماسیاب	۰/۸۰	۰/۵۸	۱۲/۹۵
کشکان	۰/۷۹	۰/۷۴	۱۳/۲۸
سیمره	۰/۷۶	۰/۶۳	۲۷/۷۸
کرخه	۰/۷۹	۰/۷۶	۳۵/۶۸

در ۲۰۰۸ به‌عنوان سال کم بارش دو مدل MOD16 و MYD16 دارای عملکرد نسبتاً یکسانی در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در منطقه مورد مطالعه هستند. در خصوص عملکرد مدل SSEBOP در این سال، نتایج بیانگر آن است که بر اساس شاخص‌های آماری نتایج این مدل در مقایسه با دو مدل دیگر دارای خطای بیشتری در برآورد تبخیر-تعرق واقعی منطقه مورد مطالعه نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل SWAT هست. با توجه به نتایج ارائه‌شده بر اساس

در مقیاس ماهانه برای سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱ به‌ترتیب به‌عنوان سال پر بارش و نرمال نتایج بیانگر آن است (جدول ۳) که هر چند نتایج تبخیر-تعرق واقعی این دو مدل MOD16 و MYD16 دارای ضریب تبیین بالاتری با مقادیر شبیه‌سازی شده مدل SWAT هستند، اما مبتنی بر سایر شاخص‌های آماری این مدل‌ها دارای خطای بیشتری نسبت به مدل SSEBOP برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در منطقه مورد مطالعه در این دو سال می‌باشند. برای سال

سال‌های مورد بررسی با شرایط اقلیمی متفاوت مشابه با نتایج به‌دست آمده برای مقیاس ماهانه است.

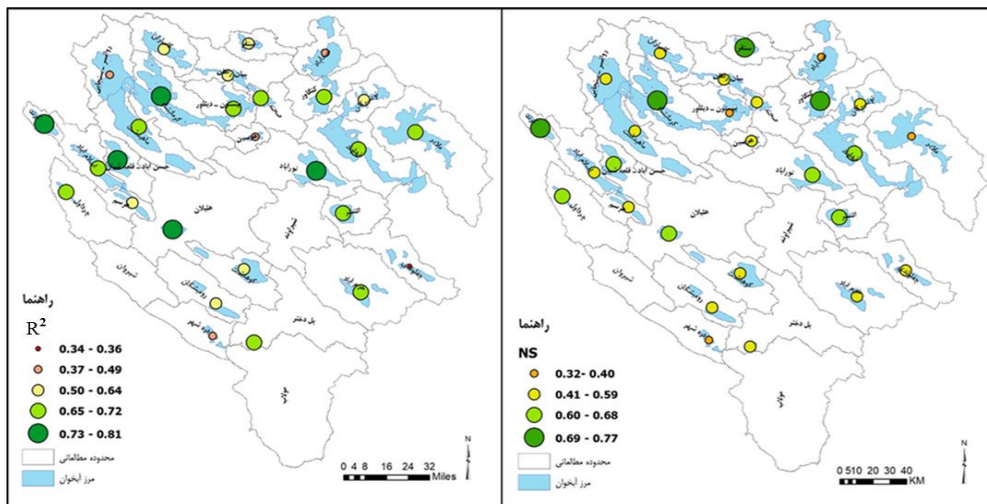
شاخص‌های آماری می‌توان مطرح کرد، در مقیاس فصلی نیز وضعیت برتری مدل‌ها از نظر دقت در



شکل ۳- نمونه‌ای از نتایج مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده جریان رودخانه

به طوری که با توجه به شاخص‌های آماری هر سه مدل میزان تبخیر-تعرق را نسبت به مدل SWAT کمتر برآورد می‌کنند. البته میزان این کم‌برآوردی در هر سه سال برای مدل SSEBOP نسبت به دو مدل دیگر کمتر بوده، همچنین، در سال ۲۰۰۸ که مقادیر تبخیر-تعرق کمتر است، میزان خطای برآورد هر سه مدل کاهش یافته است. تفاوت در دقت برآوردها با توجه به متفاوت بودن الگوریتم‌ها و ورودی‌های هر یک از مدل‌ها دور از انتظار نبود.

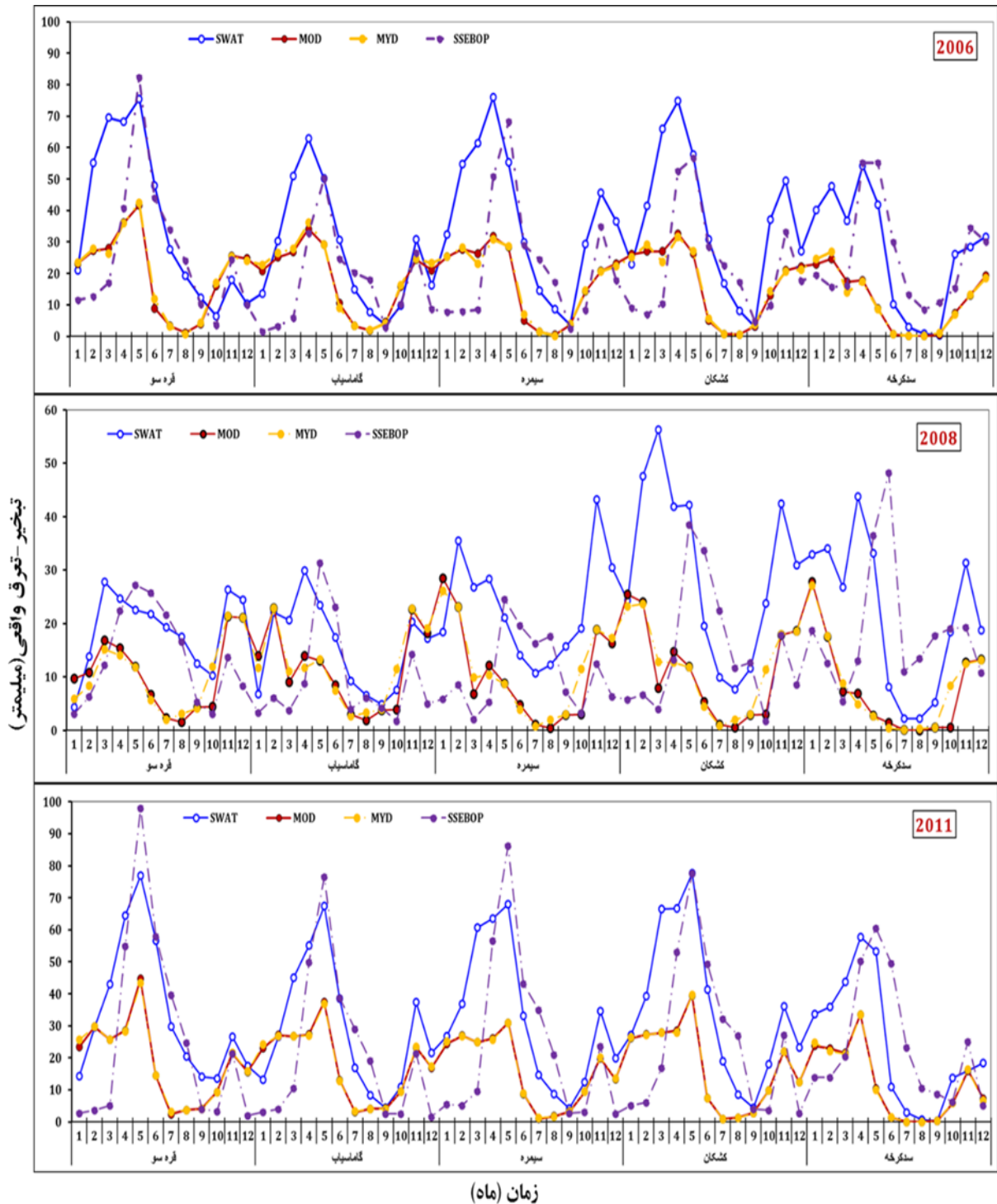
میزان سازگاری الگوی تغییرات تبخیر-تعرق واقعی در طی زمان برای پنج زیرحوضه اصلی تشکیل‌دهنده حوضه مورد مطالعه برای هر سال در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر سه مدل از روند حاکم بر تغییرات تبخیر-تعرق برآورد شده با مدل SWAT برای حوضه پیروی می‌کنند. این مسئله بیانگر شناخت خوب روند تغییرات زمانی تبخیر-تعرق واقعی به وسیله مدل‌ها در سطح حوضه است، ولی اختلاف در مقادیر برآوردی متفاوت و معنی‌دار است،



شکل ۴- نمایش مکانی مقادیر شاخص‌های R^2 و NS برای مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تغییرات تراز آبخوان‌های منطقه مطالعاتی

جدول ۳- نتایج ارزیابی ماهانه و فصلی مقادیر تبخیر-تعرق مدل‌های جهانی تبخیر-تعرق

مدل			شاخص آماری	مقیاس زمانی	سال آماری
SSEBOP	MYD	MOD			
۰/۳۲	۰/۵۶	۰/۵۹	R^2		
۲۰/۹۱	۲۱/۷۴	۲۱/۶۴	RMSE		
-۹/۸۲	-۱۵/۹۳	-۱۵/۷۸	MBE	ماهانه	
۴/۰۹	۸/۲۸	۸/۱۹	t		
۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۷	R^2/t		۲۰۰۶
۰/۳۲	۰/۶۳	۰/۶۴	R^2		
۵۵/۱۷	۵۹/۱۴	۵۹/۳۲	RMSE		
-۲۹/۴۶	-۴۷/۴۱	-۴۷/۷۴	MBE	فصلی	
۲/۶۸	۵/۶۹	۵/۷۵	t		
۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۱	R^2/t		
۰/۰۱	۰/۳۱	۰/۳۸	R^2		
۱۷/۳۱	۱۵	۱۵/۵۳	RMSE		
-۸/۱۹	-۱۱/۰۲	-۱۱/۵۱	MBE	ماهانه	
۴/۱۳	۸/۳۳	۸/۴۷	t		
۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	R^2/t		۲۰۰۸
۰/۰۳	۰/۳۹	۰/۴۲	R^2		
۴۲/۴۱	۴۰/۱۷	۴۱/۱۰	RMSE		
-۲۴/۵۸	-۳۳/۰۷	-۳۴/۵۲	MBE	فصلی	
۳/۰۲	۶/۱۵	۶/۵۶	t		
۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۶	R^2/t		
۰/۴۹	۰/۶۲	۰/۶۳	R^2		
۱۸/۸۶	۲۰/۱۶	۲۰/۰۳	RMSE		
-۹/۴۵	-۱۴/۵۴	-۱۴/۵۵	MBE	ماهانه	
۲/۸۰	۸	۸/۱۲	t		
۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۸	R^2/t		۲۰۱۱
۰/۵۲	۰/۶۸	۰/۷۰	R^2		
۴۹/۳۲	۵۵/۵۶	۵۵/۳۰	RMSE		
-۱۹/۳۶	-۴۳/۶۱	-۴۳/۶۵	MBE	فصلی	
۱/۸۱	۵/۳۷	۵/۴۶	t		
-۰/۲۹	۰/۱۳	۰/۱۳	R^2/t		



شکل ۵- تغییرات زمانی تبخیر-تعرق واقعی برآورده شده با استفاده از مدل‌های پایگاه‌های جهانی

صحت‌سنجی داده‌های تبخیر-تعرق واقعی
مدل‌های پایگاه‌های جهانی در مقیاس مکانی:
 علاوه بر ارزیابی دقت تبخیر-تعرق مدل‌های پایگاه‌های جهانی نسبت به زمان، به منظور درک بهتر عملکرد مدل‌های در برآورد تبخیر-تعرق با توجه به تغییرات مکانی در شرایط مختلف پوشش و کاربری اراضی بر

اساس نقشه کاربری سال ۲۰۰۶ دریافت شده از شرکت مدیریت منابع آب، دقت مقادیر برآورده شده به وسیله سه مدل در پنج زیرحوضه اصلی حوضه مورد مطالعه که از نظر پوشش و کاربری با یکدیگر متفاوت هستند، مورد ارزیابی قرار گرفت. این بررسی می‌تواند به انتخاب مدل مناسب با توجه به نوع پوشش و کاربری

به حوضه سیمره تقریباً یکسان است، ولی با توجه به این‌که نسبت سطح پوشش مرتعی نسبت به حوضه سیمره کمتر بوده، مساحت پوشش جنگلی نسبت به آن افزایش یافته، همبستگی بین نتایج MYD16، MOD16 و مدل SWAT نسبت به حوضه کشکان کاهش یافته است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد، در حوضه کرخه با وجود بالاتر بودن همبستگی دو مدل MYD16 و MOD16 نسبت به مدل SSEBOP با توجه به کمتر بودن شاخص‌های خطا و نتایج بهتر دو شاخص t و R^2/t مدل SSEBOP مقادیر تبخیر-تعرق واقعی را نسبت به مدل SWAT با خطای کمتری ارائه می‌کند. نکته قابل توجه در این زیرحوضه این است که با توجه به بالابودن درصد پوشش مرتع نتایج مدل‌های MYD16 و MOD16 دارای خطای بیشتری در برآورد مقادیر تبخیر-تعرق است. این مسئله می‌تواند به دلیل عدم توانایی این دو مدل در برآورد تبخیر از پهنه‌های آبی باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که هر سه مدل تبخیر و تعرق را کم برآورد کرده‌اند. ولی دقت آن‌ها در کاربری پوشش‌های مختلف یکسان نیست. به طوری که مدل‌های MOD16 و MYD16 در حوضه‌های با پوشش وسیع مرتع و جنگل نتایج را با خطای کمتری ارائه می‌کنند و مدل SSEBOP نیز در اراضی با درصد پوشش کشاورزی قابل توجه، خطای کمتری در برآورد مقادیر تبخیر-تعرق واقعی در حوضه مورد مطالعه دارد. نتایج متفاوت مدل‌ها در شرایط مختلف اقلیمی و نوع پوشش و کاربری اراضی بیانگر این مسئله است که مدل‌های مختلف به طور سیستماتیک تحت تأثیر عوامل اقلیمی و خصوصیات سطح حوضه هستند و در زمان استفاده از این مدل‌ها باید برای انتخاب مدل مورد استفاده این خصوصیات مورد توجه کاربران قرار گیرد.

تفاوت در نتایج این مدل‌ها به تفاوت الگوریتم‌ها، نوع ورودی‌ها و عدم قطعیت ذاتی موجود در آن‌ها و ملاحظات صورت گرفته در فرایندهای فیزیکی تولید این مدل‌ها بر می‌گردد. در این راستا، یکی از عوامل مهم در تفاوت عملکرد و نتایج این مدل‌ها، نحوه تعیین نوع پوشش و کاربری اراضی است، چرا که بسیاری از خواص بیوفیزیکی مانند مقاومت لایه مرزی

اراضی کمک کند. جدول ۴، درصد پوشش‌های کاربری مختلف در پنج زیرحوضه مورد نظر را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در زیرحوضه‌ها مشخص شد، دقت مدل‌های تبخیر-تعرق مورد بررسی نسبت به پوشش و نوع کاربری منطقه مورد مطالعه، متفاوت است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در حوضه قره‌سو که اراضی کشاورزی مساحتی حدود ۶۳ درصد مساحت کل آن را پوشش داده است، نتایج مدل SSEBOP نسبت به دو مدل دیگر دارای همبستگی بالاتری بوده به طوری که میزان ضریب تبیین برای مدل‌های SSEBOP، MYD16 و MOD16 به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۴۰ و ۰/۳۹ است. همچنین، با توجه به کمتر بودن میزان شاخص‌های خطای RMSE و MBE و بهتر بودن نتایج شاخص‌های t و R^2/t مدل SSEBOP در این حوضه نسبت به دو مدل دیگر عملکرد بهتری داشت. نتایج این پژوهش با نتایج سایر مطالعات که اشاره به عملکرد بهتر این مدل و ضعف دو مدل دیگر در اراضی کشاورزی اشاره کرده‌اند، تأیید می‌شود (De Paula و همکاران، ۲۰۱۹؛ Reitz و همکاران، ۲۰۱۷؛ Aguilar و همکاران، ۲۰۱۸).

با توجه به این‌که در حوضه گاماسیاب تقریباً سطح کل حوضه تحت پوشش مرتع و کشاورزی است، دقت دو مدل MYD16 و MOD16 نسبت به SSEBOP به طور قابل توجهی بالاتر بوده که با نتایج مطالعات گذشته (Reitz و همکاران، ۲۰۱۷) مبنی بر پایین تر بودن دقت مدل SSEBOP در اراضی با پوشش زیاد مرتعی، مطابقت دارد. همان‌طور که شاخص‌های آماری در جدول ۵ نشان می‌دهند، در حوضه سیمره با توجه به کاهش از سطوح کشاورزی و افزایش سطوح جنگلی و مرتع دقت دو مدل MYD16 و MOD16 به طور قابل توجهی افزایش یافته و دقت مدل SSEBOP کاهش یافته که تأییدکننده همبستگی بالاتر نتایج برآورد این دو مدل در حوضه‌های با پوشش غیرکشاورزی است.

در حوضه کشکان نیز با توجه به بالابودن درصد سطوح جنگلی و مرتع دقت دو مدل MYD16 و MOD16 نسبت به مدل SSEBOP بالاتر است. البته با وجود این‌که در این حوضه درصد کشاورزی نسبت

حال مقداری از این خطا نیز به عدم قطعیت موجود در نتایج مدل SWAT نیز مربوط می‌شود. لذا، دقت نسبی این مدل‌ها باید به‌طور گسترده‌ای در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد تا نقاط ضعف و قوت هر کدام مشخص شود و بدین‌طریق، درک ما از عملکرد این مدل‌ها در شرایط مختلف افزایش یافته تا کاربران بتوانند با توجه به شرایط و اهداف مورد نظر مدل‌های مناسب را انتخاب کنند. همچنین، توسعه‌دهندگان این الگوریتم‌ها با آگاهی پیدا کردن از نقاط ضعف و قدرت هر کدام از این الگوریتم‌ها در شرایط مختلف بتوانند سعی در بهبود دقت این مدل‌ها کنند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ارزیابی میزان دقت داده‌های تبخیر-تعرق واقعی مدل‌های پایگاه جهانی MOD16، MYD16 و SSEBOP برای مقیاس‌های زمانی مختلف (ماهانه و فصلی) در شرایط اقلیمی سال‌های تر، خشک و نرمال و همچنین، بررسی میزان دقت این مدل‌ها تحت شرایط کاربری مختلف در سطح حوضه بزرگ سد کرخه صورت گرفت. برای این منظور، پس از اطمینان از واسنجی مدل SWAT مبتنی بر جریان پایه و آبدهی ایستگاه‌های هیدرومتری و هیدروگراف آبخوان‌های واقع برای حوضه مورد مطالعه، میزان دقت و خطای بین تبخیر-تعرق واقعی این مدل‌ها در مقایسه با مقادیر خروجی تبخیر-تعرق واقعی مدل SWAT مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، هر سه مدل میزان تبخیر-تعرق واقعی را نسبت به مدل SWAT با اختلاف معنی‌داری کمتر برآورد می‌کنند و شاخص‌های آماری برای هر سه مدل در سال‌های مختلف و حتی در مقیاس‌های ماهانه و فصلی متفاوت است و در این راستا، میزان خطای بین هر سه مدل تبخیر-تعرق در سال‌های پربارش و نرمال کمتر از سال‌های خشک هست. این نتیجه بیانگر تأثیر شرایط آب و هوایی بر نتایج عملکرد مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق است.

میزان سازگاری الگوی تغییرات سری زمانی تبخیر-تعرق واقعی برای هر سه مدل از روند حاکم بر تغییرات تبخیر-تعرق برآورد شده با مدل SWAT

و همچنین، شاخص‌های به‌کار رفته در الگوریتم تولید این مدل‌ها مانند LAI^1 ، $FAPR^2$ ، $NDVI^3$ و ضریب آبییدو با توجه به نوع پوشش و کاربری اراضی تعیین می‌شود که هر یک از این پارامترها بر میزان تبخیر-تعرق به‌دست آمده از این الگوریتم‌ها موثر است. لذا، از آنجا که هر یک از این مدل‌ها از نقشه کاربری مخصوص به داده‌های سنجنده مختلف استفاده می‌کنند، این مسئله می‌تواند یکی از عوامل تفاوت در تبخیر-تعرق برآوردشده با استفاده از هر کدام از این مدل‌ها باشد. در پژوهش‌های گذشته نیز اشاره شده در صورتی که از نقشه کاربری تولیدشده با استفاده از داده‌های سنجنده مادیس به‌عنوان ورودی مدل SWAT استفاده شود، می‌توان شاهد بهبود همبستگی بین نتایج تبخیر-تعرق به‌دست آمده از این مدل و MOD16 بود (Abiodun و همکاران، ۲۰۱۸).

میزان رطوبت موجود در خاک، یکی دیگر از پارامترهایی است که به میزان قابل‌توجهی بر مقاومت آبرودینامیک، مقاومت سطح برگ و حتی مقاومت سطح خاک تأثیر می‌گذارد. با توجه به استفاده از داده‌های سنجنش از دور برای برآورد این پارامتر در الگوریتم مدل‌های تولید تبخیر-تعرق، وجود عدم قطعیت ذاتی در مقادیر آن می‌تواند بر نتایج تبخیر-تعرق حاصل از این الگوریتم‌ها تأثیر بگذارد. همچنین، استفاده از داده‌های هواشناسی جهانی به‌عنوان ورودی این الگوریتم‌ها می‌تواند یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر دقت این مدل‌ها باشد. چرا که مقادیر اولیه این داده‌ها در مقیاس مکانی حدود ۱۰۰ کیلومتر است و به‌منظور کاربرد این اطلاعات در این مدل‌ها، از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی بهره گرفته شده است. لذا، منابع عدم قطعیت موجود در این فرایند می‌تواند سبب تفاوت در نتایج این مدل‌ها شود. مسئله دیگری که باید توجه داشت این است که هر چند اختلاف موجود در نتایج به‌دست آمده بین این مدل‌ها و مدل SWAT تا حدود زیادی ناشی از خطاهای روش‌های برآورد پارامترها و ورودی‌های این مدل‌ها است، ولی در عین

¹ Leaf Area Index

² Fraction of Absorbed Photosynthetic Radiation

³ Normalized Difference Vegetation Index

است، به طوری که در حالت کلی می‌توان مطرح کرد که در حوضه‌های با کاربری غالب کشاورزی مدل SSEBOP و در حوضه‌های با کاربری غالب جنگل و مرتع، مدل‌های MYD16 و MOD16 از خطای کمتری، برخوردار هستند.

برای حوضه پیروی می‌کند. این مسئله بیانگر شناخت روند تغییرات زمانی تبخیر-تعرق به وسیله مدل‌ها در سطح حوضه است، ولی اختلاف در مقادیر برآوردی متفاوت و معنی‌دار است. همچنین، نتایج نشان داد که صحت مدل‌های تبخیر-تعرق مورد بررسی نسبت به پوشش و نوع کاربری منطقه مورد مطالعه، متفاوت

جدول ۴- درصد پوشش کاربری زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه

حوضه	کشاورزی	جنگل	مرتع	سطوح آبی	بایر
قره‌سو	۶۲/۷	۴/۸	۳۰/۱	۰/۲	۲/۳
گاماسیاب	۴۸/۳	۰/۲	۵۰	۰/۱	۱/۵
سیمره	۴۱/۳	۳۸/۲	۱۹/۹	۰/۱	۰/۵
کشکان	۴۰/۴	۴۱	۱۸	۰/۰	۰/۶
کرخه	۱۴/۰	۲۸/۱	۵۴/۹	۲/۸	۰/۲

جدول ۵- نتایج ارزیابی مکانی مقادیر تبخیر-تعرق واقعی ماهانه مدل‌های پایگاه‌های جهانی در مقیاس زیرحوضه

زیرحوضه	شاخص آماری	مدل		
		SSEBOP	MYD	MOD
قره‌سو	R ²	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۳۹
	RMSE	۲۱/۶۱	۲۴/۸۲	۲۵/۰۹
	MBE	-۹/۷۶	-۱۵/۷۱	-۱۵/۹۴
	t	۱/۶۸	۲/۷۱	۲/۷۳
	R ² /t	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۱۴
گاماسیاب	R ²	۰/۳۲	۰/۶۰	۰/۶۱
	RMSE	۱۴/۴۳	۱۴/۵۷	۱۴/۷۵
	MBE	-۹/۷۷	-۸/۷۰	-۸/۰۵
	t	۲/۰۷	۲/۴۷	۲/۱۶
	R ² /t	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۲۹
سیمره	R ²	۰/۲۳	۰/۷۹	۰/۸۰
	RMSE	۲۴/۹۸	۲۳/۷۷	۲۳/۴۱
	MBE	-۱۴/۲۶	-۲۰/۱۷	-۲۰/۰
	t	۲/۳۱	۵/۳۱	۵/۴۶
	R ² /t	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱۵
کشکان	R ²	۰/۳۴	۰/۶۱	۰/۶۳
	RMSE	۲۲/۷۱	۲۴/۳۳	۲۳/۹۵
	MBE	-۱۳/۸۸	-۱۹/۳۵	-۱۹/۲۰
	t	۲/۵۶	۴/۳۵	۴/۴۴
	R ² /t	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۴
کرخه	R ²	۰/۳۵	۰/۷۳	۰/۷۶
	RMSE	۱۵/۴۸	۱۹/۴۱	۱۹/۳۲
	MBE	-۱/۴۴	-۱۵/۷۴	-۱۵/۷۳
	t	۰/۳۱	۴/۶۰	۴/۶۶
	R ² /t	۱/۱۲	۰/۱۶	۰/۱۶

عوامل اقلیمی و خصوصیات سطح حوضه هستند که در زمان استفاده از این مدل‌ها باید برای انتخاب مدل مورد استفاده این خصوصیات مورد توجه کاربران قرار

نتایج متفاوت مدل‌ها در شرایط مختلف اقلیمی و نوع پوشش و کاربری اراضی بیانگر این مسئله است که مدل‌های مختلف به‌طور سیستماتیک تحت تأثیر

قرار گیرد. با توجه به نتایج متفاوت دقت این مدل‌ها در شرایط اقلیمی و مکانی متفاوت، پیشنهاد می‌شود، در مطالعات آتی پس از ارزیابی دقت داده‌های تبخیر-تعرق واقعی سایر مدل‌های پایگاه‌های جهانی از قبیل GLDAS و GLEAM که برای محدوده مطالعاتی در دسترس است و همچنین، با ارزیابی تأثیر اعمال خصوصیات فیزیکی ثابت و دینامیکی حوزه آبخیز و لحاظ کردن این خصوصیات امکان تولید یک مدل ترکیبی از این مدل‌ها که سبب کاهش خطای برآورد تبخیر-تعرق واقعی در سطح حوضه شود، مورد پژوهش قرار گیرد.

گردد. تفاوت در نتایج این مدل‌ها به تفاوت الگوریتم‌ها، نوع ورودی‌ها و عدم قطعیت ذاتی موجود در آن‌ها و ملاحظات صورت‌گرفته در فرایندهای فیزیکی تولید آن‌ها بر می‌گردد. به‌طور کلی با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش می‌توان مطرح کرد، با وجود تشخیص روند تغییرات تبخیر-تعرق واقعی به‌وسیله این مدل‌ها نتایج آن‌ها دارای اختلاف زیادی با نتایج مدل SWAT هست. لذا باید توجه داشت، قبل از توصیه استفاده از این مدل‌ها، در یک محدوده مورد مطالعه باید، ابتدا دقت آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته، در انتخاب مدل مورد استفاده شرایط حوضه مد نظر

منابع مورد استفاده

1. Abiodun, O.O., H. Guan, V.E.A. Post and O. Batelaan. 2018. Comparison of MODIS and SWAT evapotranspiration over a complex terrain at different spatial scales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22: 2775–2794.
2. Aguilar, A.L., H. Flores, G. Crespo, M.I. Marin, I. Campos and A. Calera. 2018. Performance assessment of MOD16 in evapotranspiration evaluation in northwestern Mexico. *Water*, 20: 901–914.
3. Allen, R.G., L.S. Pereira, T.A. Howell and M.E. Jensen. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98: 899–920.
4. Gao, Y. and D. Long. 2008. Intercomparison of remote sensing-based models for estimation of evapotranspiration and accuracy assessment based on SWAT. *Hydrological Processes*, 22: 4850–4869.
5. Gowda, P.H., J.L. Chávez, P.D. Colaizzi, S.R. Evett, T.A. Howell and J.A. Tolck. 2007. Remote sensing based energy balance algorithms for mapping ET: current status and future challenges. *Transactions of the ASABE*, 50(5): 1639–1644.
6. Onușluel Gül, G. and D. Rosbjerg. 2010. Modeling of hydrologic processes and potential response to climate change through the use of a multisite SWAT. *Water and Environment Journal*, 24(1): 21–31.
7. Hofste, R.W. 2014. Comparative analysis among near-operational evapotranspiration products for the Nile Basin based on earth observations. MSc Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 124 pages.
8. Idso, S.B., R.D. Jackson and R.J. Reginato. 1975. Estimating evaporation: a technique adaptable to remote sensing. *Science*, 189(1): 991–992.
9. Jacovides, C.P. 1997. Reply to comment on statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. *Agricultural Water Management*, 3: 90–97.
10. Jain, S.K., J. Tagi and V. Singh. 2010. Simulation of runoff and sediment yield for a Himalayan watershed using SWAT model. *Journal of Water Resource and Protection*, 2: 267–281.
11. Jongjina, B., J. Jaehwanb, P. Jongminc and C. Minhad. 2019. A study on the analyzing of uncertainty for actual evapotranspiration: flux tower, satellite-based and reanalysis based dataset. *Journal of Korea Water Resources Association*, 52: 11–19.
12. Liu, S., Z. Xu, Z. Zhu, Z. Jia and M. Zhu. 2013. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin China. *Journal of Hydrology*, 487:24–38.
13. Long, D., L. Longuevergne and B.R. Scanlon. 2014. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 50: 1131–1151.
14. Liu, W., L. Wang, J. Zhou, Y. Li, F. Sun, G. Fu, X. Li and Y. Fang Sang. 2016. A worldwide evaluation of basin-scale evapotranspiration estimates against the water balance method. *Journal of Hydrology*, 538: 82–95.
15. Liu, X., C. Liu and W. Brutsaert. 2018. Investigation of a generalized nonlinear form of the complementary principle for evaporation estimation. *Journal of Geophysical Research*:

- Atmospheres, 123(8): 3933–3942.
16. Melesse, A.M., W. Abtew and T. Dessalegne. 2009. Evaporation estimation of Rift Valley lakes: comparison of models. *Sensors*, 9: 9603–9615.
 17. Mianabadi, A., A. Alizade, S.H. Sanayinejad, B. Ghahremanand and K. Davari. 2016. Evaluation of Sebal algorithm for actual evapotranspiration estimat in Neyshabor-Rokh Basin with SWAT model. *Research Water in Agricultur Journal*, 30(4): 525-541 (in Persian).
 18. Moyano, M.C., M. Garcia, A.P. Orueta, L. Tornos, J.B. Fisher, N. Fernández, L. Recuero and L. Juana. 2018. Vegetation water use based on a thermal and optical remote sensing model in the Mediterranean region of Doñana. *Remote Sensing*, 10: 1601-1623.
 19. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2017. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50: 885–900.
 20. Nachabe, M., N. Shah, M. Ross and J. Vomacka. 2005. Evapotranspiration of two vegetation covers in a shallow water table environment. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 492–499.
 21. De Paula, A.C.P., C.L. da Silva, L.N. Rodrigues and M. Scherer-Warren. 2019. Performance of the SSEBOP model in the estimation of the actual evapotranspiration of soybean and bean crops. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 54:1678-1688.
 22. Reitz, M., G.B. Senay and W.E. Sanford. 2017. Combining remote sensing and water-balance evapotranspiration estimates for the conterminous United States. *Remote Sensing*, 9: 1181-1197.
 23. Ramoelo, A., N. Majoz, R. Mathieu, N. Jovanovic, A. Nickles and S. Dzikiti. 2014. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African Savanna, South Africa. *Remote Sensing*, 6: 7406-7423.
 24. Raz-Yaseef, N., D. Yakir, G. Schiller and S. Cohen. 2013. Dynamics of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 157: 77–85.
 25. Sharma, D.N. and V. Tare1. 2018. Evaporation estimation using SSEBOP method SENTINEL-2 and Landsat-8 dataset. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5: 20-25.
 26. Sabziparvar, A.A., F. Tafazoli, H. Zare Abyane, H. Banezhad, M. Mosavi Bayegi, A. Mohseni Movahed and N. Meryanji. 2008. Comparison of several models to estimate reference evapotranspiration in a cold and semi arid climates in order to optimize usage of radiation models. *Soil and Water Journal (Agricultural Industry and Science)*, 22(2): 328-340 (in Persian).
 27. Yang, J., P. Reichert, K. Abbaspour, J. Xia and H. Yang. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358: 1–23.