

بهبود تخمین سیلاب مدل HEC-HMS با روندیابی مکانی تبخیر-تعرق به وسیله الگوریتم سبس

مریم زارع^۱، ام‌البنین بذرافشان^{۲*}، مجتبی پاک‌پرور^۳ و غلامرضا قهاری^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، ^۲ استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان و ^۳ ^۴ استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۹

چکیده

محدودیت‌های روش‌های فیزیکی و تجربی برآورد تبخیر-تعرق، کاربرد فناوری سنجش از دور را برای حل معادله بیلان انرژی در سال‌های اخیر رایج ساخته است. در این پژوهش، به‌منظور تدقیق عامل تبخیر-تعرق در مدل HEC-HMS و بهبود تخمین سیلاب، تعداد نه تصویر لندست ۸، داده‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه محلی و مدل SEBS، تبخیر-تعرق مربوط به پنج واقعه در دوره زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ در حوزه آبخیز کلستان واقع در شمال غربی شیراز محاسبه و به کمک داده‌های فائو پنمن-مانتیس در یک پیکره آبی اعتبارسنجی شد. تبخیر در HEC-HMS شامل تبخیر مستقیم از آب و از سطح خاک و تعرق گیاهی به‌صورت یک ارتفاع متوسط تخمین زده می‌شود. در این پژوهش، سعی شد با جایگزین کردن تبخیر-تعرق واقعی در مدل HEC-HMS، میزان رواناب حاصل از بارش با دقت بیشتری محاسبه شود. نتایج نشان داد، پس از تدقیق تبخیر-تعرق، همبستگی سیلاب مدل با سیلاب اندازه‌گیری شده افزایش مشهودی داشته، به‌طوری که R^2 از ۹۲ به ۹۹ درصد و RMSE از ۰/۱۴ به ۰/۰۱ رسیده است. نتایج همچنین، نشانگر آن است که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم SEBS ابزار مناسبی برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی می‌باشد. این تحقیق با در نظر گرفتن تشخیص کارایی SEBS در تعیین پراکنش مکانی و زمانی تبخیر-تعرق در یک منطقه کوهستانی و با هدف هیدرولوژیک، انجام شده است. چراکه محاسبه ET در مدل‌های هیدرولوژیک می‌تواند سبب بهبود نتایج و افزایش دقت مدل‌های مذکور شود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق واقعی، رواناب، روش بیلان انرژی، سنجش از دور، فائو پنمن-مانتیس

مقدمه

به‌منظور بهبود مدیریت منابع آب هستند. ضرورت حفظ و نگهداری از منابع آبی ایجاب می‌کند که برآورد دبی اوج سیلاب، به‌عنوان یک امر مهم در مهار سیلاب‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در مدیریت جامع منابع آب بایستی مبنای مدل‌سازی در واحد مکانی به‌نام حوزه آبخیز قرار گیرد (Singh, ۱۹۹۵). امروزه

مدل‌های بارش-رواناب یکی از روش‌های تخمین رواناب و ابزاری مناسب برای مطالعه فرایندهای هیدرولوژیک و ارزیابی منابع آبی است (Wildhaber) و همکاران، ۲۰۱۵). مدل‌های هیدرولوژیک قادر به شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیک سطح زمین

هیدروگراف و جریان پایه، خصوصیات آبراهه‌ها نظیر میزان تلفات و روش روندیابی، خصوصیات محل‌های کنترل جریان، مدل اقلیمی؛ شامل ایستگاه‌های هواشناسی، روش اثرگذاری مقدار بارش هر ایستگاه بر میزان رواناب و شاخص‌های کنترلی؛ شامل زمان شروع و پایان مدل‌سازی و گام‌های زمانی مدل‌سازی می‌باشد (Joo و همکاران، ۲۰۱۴). محققین مختلفی در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که عوامل متعددی در بروز سیل در مناطق مختلف مؤثر است که از جمله این عوامل می‌توان به ویژگی‌های توپوگرافی، مورفولوژی رودخانه و فعالیت‌های بشری اشاره کرد. از این‌رو، کنترل و مقابله با سیل و شناخت عوامل و پارامترهای مؤثر بر سیلاب اهمیت بسیار زیادی دارد (Kamanbedast، ۲۰۱۱، Brooks، ۱۹۸۱، Chang و همکاران، ۲۰۱۳). شبیه‌سازی رواناب در آبخیزهایی با کمبود یا فقدان ایستگاه‌های هواشناسی را، به‌صورت یک مشکل بزرگ در مدل‌های هیدرولوژیک قلمداد می‌کنند (Smith، ۱۹۹۲). در چنین شرایطی، توسعه مدل‌هایی که بتواند پیش‌بینی سیلاب را با دقت کافی انجام دهد، در کنار برآورد هر چه دقیق‌تر پارامترهای مدل، لزوم استفاده از روش‌های نوین واسنجی را بیش از پیش نمایان می‌کند. نتایج مدل‌سازی در مطالعه‌ای با استفاده از مدل‌های HEC-HMS و HEC-GeoHMS با ایجاد شبکه تحلیل هیدرولوژیک در حوزه‌های آبخیز، مدل‌های توزیعی، نیمه‌توزیعی و یکپارچه مقایسه شد (Wildhaber و همکاران، ۲۰۱۵). آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نتایج مذکور جواب‌های منطقی را در تخمین سیلاب مشاهده‌ای و حجم کل رواناب نشان می‌دهد. مدل سبس به‌وسیله تیم متخصصان هلندی (Su، ۲۰۰۲) معرفی شده و به‌دلیل دقت مطلوب، سهولت دسترسی به نرم‌افزار و نیز ساده بودن ورودی‌های آن، جای خود را در منابع علمی باز کرده است. در تحقیقات متعددی نتایج آن را با واقعیت منطبق یافته (Lu و همکاران، ۲۰۱۳؛ Su و همکاران، ۲۰۰۳؛ McCabe و Wood، ۲۰۰۶؛ Su و همکاران، ۲۰۰۲) و در مقابل در برخی تحقیقات دیگر تخمین‌های آن را برای اراضی بایر بیش از واقعیت تشخیص داده‌اند (Gokmen و همکاران، ۲۰۱۲). امروزه با توجه به موفقیت گسترده در کاربرد مدل‌های

فنون جدید سنجش از دور مثل سبس^۱ توسعه داده شده‌اند تا بتوان تبخیر-تعرق (ET) را در مقیاس وسیع و برای مناطق ناهمگن برآورد کرد. اساس این فنون معادله بیلان انرژی است (Su، ۲۰۰۲). برآورد دقیق تبخیر-تعرق (ETO)، در تامین نیاز آبی گیاهان، برنامه‌ریزی آبیاری و مطالعه بیلان آب مخازن ضرورت دارد. با این حال، اندازه‌گیری تبخیر-تعرق با این روش پرهزینه بوده، نیازمند صرف وقت زیاد است. از این‌رو، در غالب موارد، برای این کار از روش‌های غیرمستقیم که شامل طیف وسیعی از مدل‌های ساده تجربی (مانند روش‌های تشعشی، دمایی، رطوبتی و تشت تبخیر) تا روش‌های پیچیده ترکیبی (مانند فائو پنمن-مانتیس) است، استفاده می‌شود (Tabari و همکاران، ۲۰۱۳). تبخیر-تعرق (ET) یک مکانیزم اولیه برای انتقال آب و حرارت بین زمین و جو است. یک روش برای تخمین ET استفاده از داده‌های سنجش از دور می‌باشد (Li و Tang، ۲۰۱۷). سبس الگوریتمی است که برپایه مفهوم بیلان انرژی طراحی شده، برای تخمین شارهای انرژی از مشاهدات طیفی ماهواره و اطلاعات هواشناسی استفاده می‌کند. طی فرایند ET، حجم بالایی از آب خاک سطحی به‌صورت تبخیر و آب خاک زیرسطحی از طریق پوشش گیاهی و به‌صورت تعرق به اتمسفر انتقال داده می‌شود. امروزه به‌طور فزاینده از مدل‌های ریاضی به‌عنوان ابزاری مؤثر برای شبیه‌سازی و مدیریت بهینه منابع آب استفاده می‌شود. HEC-HMS از نرم‌افزارهای معتبر در زمینه‌های کاربردی هیدرولوژی است که از تعدادی مدل ریاضی برای محاسبه مدل هیدرولوژیک بارش-رواناب (HRR) روندیابی سیلاب و مخزن نفوذ و ... استفاده می‌کند (Brooks، ۱۹۸۱). این مدل، یکی از انواع مدل‌های ریاضی رایج‌ای بوده که خود دارای چندین زیر مدل در بخش‌های رواناب، جریان سطحی، دبی پایه و جریان کانالی است و برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز به‌کار می‌رود. HEC-HMS دارای یک بخش اصلی به‌نام مدل حوزه آبخیز شامل؛ شمای کلی حوزه آبخیز، خصوصیات زیرحوضه‌ها نظیر مساحت و نوع مدل‌سازی

¹ Surface Energy Balance System (SEBS)

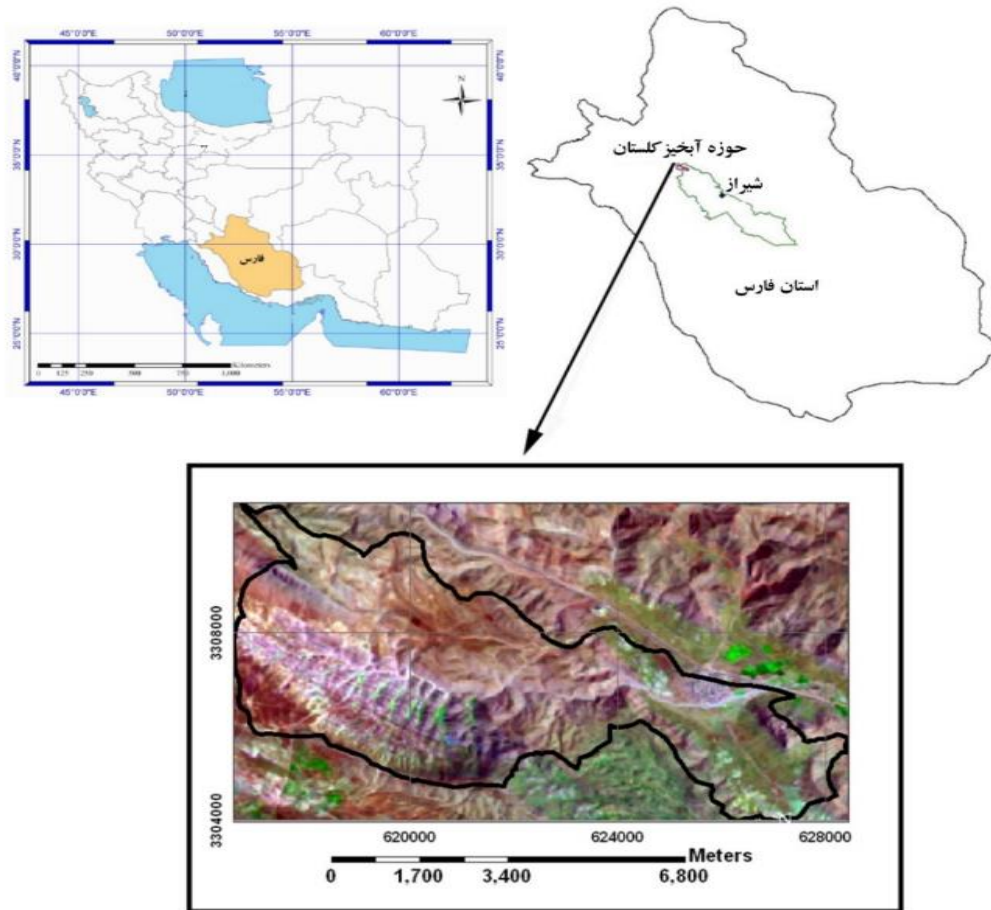
یا صحت‌سنجی مدل در میان آن‌ها دیده نمی‌شود. کار با مدل سبس نیز در کشور در چند مورد انجام شده است (Mahour و همکاران، ۲۰۱۵؛ Bansouleh و همکاران، ۲۰۱۵). در تحقیقی که به‌وسیله Pakparvar (۲۰۱۵) با استفاده از روش سبس و تصاویر لندست ETM برای برآورد ETa در دشت گریگان انجام شد، نتایجی که از نقشه‌های مکانی و اثرات زمانی کاربری‌های مختلف زمین با مقادیر تبخیر-تعرق مرجع^۱ حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی به‌دست آمده بود را مقایسه کردند. در نهایت، نتایج به‌دست آمده از سبس در برآورد مکانی و زمانی ET توانایی مطلوبی نشان داد. جمع‌بندی تحقیقات مورد اشاره در بندهای پیشین نشان داد، تلفیق مدل‌های بیوفیزیک و سنجش از دور از یک سو و مدل‌های هیدرولوژیک از سوی دیگر، می‌تواند تاثیر به‌سزایی در افزایش دقت نتایج این مدل‌ها داشته، از آن‌ها ابزار کارآمدتری برای شبیه‌سازی اثرات اقلیمی، تغییر کاربری اراضی و پوشش گیاهی بر روی رژیم سیلابی حوزه‌های آبخیز به‌منظور مدیریت کارآمد سیلاب مورد استفاده قرار گیرد. این تحقیق، با هدف‌هایی همچون تشخیص کارایی سبس در تعیین پراکنش مکانی و زمانی تبخیر-تعرق در یک منطقه کوهستانی و نیز کاربرد تبخیر-تعرق تدقیق شده با مدل سبس در بهینه‌سازی تخمین سیلاب از طریق مقایسه آن با داده‌های مشاهده‌ای انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز گلستان با مساحت ۳۶۶۸/۸۶ هکتار در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال غربی شیراز قرار دارد (شکل ۱). میانگین درازمدت ۲۲ ساله بارش از نزدیک‌ترین ایستگاه باران‌سنجی (قلات) به حوزه آبخیز ۵۴۴/۱۶ میلی‌متر است. میانگین رطوبت نسبی سالانه ۵۴/۹۲ درصد و میانگین تبخیر سالانه از سطح آزاد ۲۰۳۰ میلی‌متر و میانگین ET_o به‌روش بلانی کریدل ۱۶۶۸ میلی‌متر گزارش شده است. روش دومارتن اقلیم منطقه را نیمه‌مرطوب نشان می‌دهد.

توازن انرژی، متخصصان پیشنهاد در روش‌های سنتی برآورد ET به این مدل‌ها گرایش پیدا کرده، به‌گونه‌ای که مقالات و انتشارات جدید آن‌ها همگی بر توسعه و بهینه‌سازی متمرکز شده است. از پرکاربردترین مدل‌ها می‌توان به سبس اشاره کرد. درباره استفاده از سنجش از دور برای برآورد ET تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. این مطالعات نشان‌دهنده کارایی روش‌های سنجش از دور، در برآورد ETa در مقیاس منطقه‌ای و سطوح بزرگ است. تا کنون الگوریتم‌های مختلفی برای برآورد ET ارائه شده‌اند. از جمله الگوریتم بیلان انرژی در سطح زمین (Bastiaanssen و همکاران، ۱۹۹۸؛ Bastiaanssen و همکاران، ۲۰۰۵؛ Wang و همکاران، ۲۰۰۵)، الگوریتم ساده شاخص بیلان انرژی سطح (Roerink و همکاران، ۲۰۰۰؛ Su، ۲۰۰۲)، سامانه بیلان انرژی سطح (بیلان انرژی دو منبعی) (Kustas و همکاران، ۱۹۹۴) و در نهایت، الگوریتمی برای به‌دست آوردن ET در وضوح بالا با کالیبراسیون داخلی (Allen و همکاران، ۲۰۰۷) است. بیلان آب در حوزه‌های بیابانی و نیمه‌بیابانی به‌وسیله Gowda و Howell (۲۰۱۵) برآورد شد. در این حوضه ۳۱ میلی‌متر مکعب به‌دست آمد و برای ET از تصاویر ماهواره‌ای لندست و همچنین، الگوریتم سبس استفاده شد. ET به‌دست آمده ۳۷ درصد از منابع آب حوضه برآورد شد. جمع‌بندی تحقیقات مورد اشاره، در بندهای پیشین نشان می‌دهد که یکی از مسایل مهم و اساسی که در مدیریت حوزه‌های آبخیز و مطالعات کنترل سیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطالعات مختلف، دلالت بر این موضوع دارد که عدم توجه به حریم مسیل‌ها و رودخانه‌ها باعث ایجاد یک رشد نمایی در فراوانی وقوع سیلاب و میزان خسارات وارده شده است و در این میان مناطق شهری و نیمه‌شهری بیشترین پتانسیل خطرپذیری از سیل را دارا هستند. امروزه استفاده از فناوری سنجش از دور، با توجه به امکان برآورد مکانی اطلاعات و کمینه ساختن داده‌های هواشناسی، کاربرد وسیعی در این زمینه یافته است. در همه موارد یاد شده، محققان تلاش کرده‌اند تا ضمن معرفی مدل برای کاربرد در یک منطقه خاص، پراکنش ET را به نقشه در آوردند، اما واسنجی

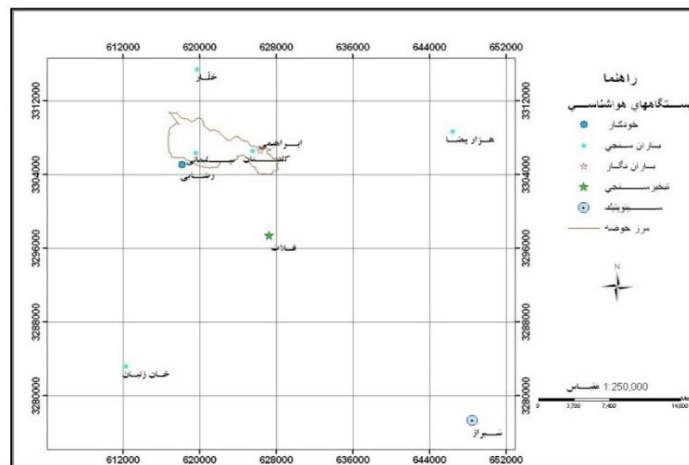
^۱ ET_o



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز کلستان در فارس و نسبت به حوضه مهارلو بر روی تصویر ماهواره‌ای کاذب رنگی ۷،۵،۲ تاریخ ۲۰ فروردین ۱۳۹۷ لندست ۸

ثبت داده‌های هواشناسی حوزه آبخیز کلستان به‌ویژه بارش در سه ناحیه حوضه، دستگاه اندازه‌گیری نصب شد که داده‌های مورد استفاده ما برای راه‌اندازی مدل سبب هستند (شکل ۲).

شاخص‌های حرارتی نزدیک‌ترین ایستگاه تیخیرسنجی (قلات) به حوضه به‌صورت میانگین سالانه ۱۵/۰۸، میانگین بیشینه‌ها ۲۰/۶۸ و میانگین کمینه‌ها ۹/۵۳، بیشینه مطلق ۳۹ و کمینه مطلق ۱۴/۵- سانتی‌گراد است. لازم به‌ذکر است که برای



شکل ۲- نقشه پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده حوزه آبخیز کلستان در فارس

روش مدل سازی هیدرولوژیکی: مدل های هیدرولوژی قادر به شبیه سازی فرایندهای هیدرولوژیکی سطح زمین به منظور بهبود مدیریت منابع آب هستند. در این تحقیق، با استفاده از الحاقیه HECGeo-HMS تعداد ۱۲ زیرحوزه آبخیز انتخاب شد. سپس، روش شماره منحنی برای تلفات، روش شبیه سازی هیدرولوژیکی SCS در بخش انتقال و روش ماسکینگهام برای روندیابی سیل برگزیده شد. سپس، کار بهینه سازی و استخراج مدل منطقی دنبال شد تا بین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه رودخانه گلستان و دبی های سیلاب بیشینه لحظه ای با دوره های برگشت مختلف، رابطه مناسبی برقرار شود.

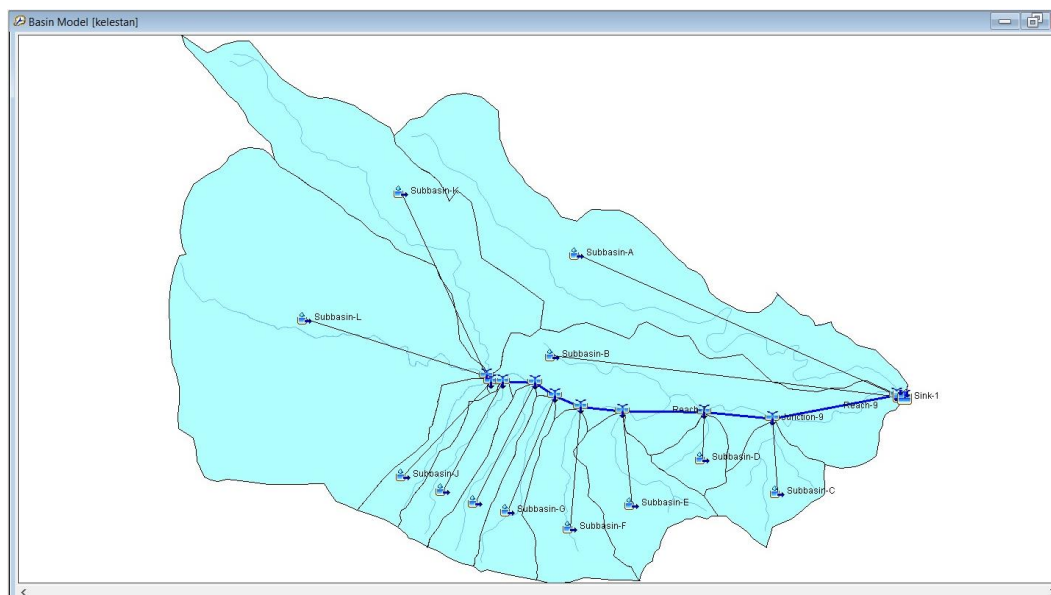
همچنین، یک سری مقایسه، بین داده ET مدل بارش رواناب HEC-HMS و مدل سبس اعمال شد. پس از بررسی های لازم، از وقایع داده های تعداد سه واقعه برای واسنجی و ارزیابی مدل گردآوری و دو واقعه مورد اندازه گیری قرار گرفت. برای بررسی هیدرولوژیکی حوضه از روش SCS استفاده شد. خاک های حوضه از نظر توان تولید رواناب در سه گروه A، B و C قرار می گیرند. خصوصیات فیزیوگرافی حوضه مورد مطالعه بر اساس مدل رقوم ارتفاعی حوضه در نرم افزار ArcGIS محاسبه و خلاصه آن ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی های زیرحوضه های آبخیز گلستان

زیر حوضه	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	کل
مساحت (km ²)	۵/۱۰	۳/۷۳	۰/۹۷	۰/۴۴	۱/۲۷	۱/۲۷	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۶۲	۳/۶۶	۹/۱۲	۲۸/۴۱
محیط (km)	۱۵/۳۶	۱۳/۵۵	۴/۲۱	۲/۷۹	۵/۴۱	۵/۶۶	۵/۱۱	۴/۹۶	۴/۶۹	۴/۸۸	۱۲/۱۷	۱۲/۱۷	۲۶/۶۲
طول آبراهه اصلی (km)	۸/۵۳	۵/۵۴	۱/۴۲	۰/۹۱	۱/۵۸	۱/۷۸	۲/۱۸	۲/۱۶	۲/۰۶	۲/۱۱	۵/۳۷	۴/۴۱	۱۰/۹۵
طول کل آبراهه ها (km)	۱۴/۲۴	۱۳/۳۳	۴/۳۵	۲/۲۶	۵/۳۱	۴/۴۹	۴/۵۶	۴/۶۹	۳/۸۸	۳/۸۲	۱۱/۳۹	۳۳/۶۵	۱۰۸/۵۵
اختلاف ارتفاع (m)	۳۸۴	۲۴۹	۲۵۶	۲۲۳	۴۲۸	۴۰۶	۲۸۰	۲۰۶	۲۱۰	۱۸۸	۵۷۰	۴۲۹	۷۱۱
تراکم آبراهه (km ²)	۲/۷۷	۳/۵۷	۴/۴۹	۵/۱۵	۴/۲۰	۳/۵۳	۵/۹۰	۶/۸۰	۵/۱۰	۶/۱۴	۳/۱۱	۳/۶۹	۳/۸۲
نسبت دایره ای	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۶۸	۰/۷۱	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۴۳	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۷۷	۰/۵۰
نسبت کشیدگی	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۷۶	۰/۷۹	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۵۰	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۹۳	۰/۵۶
قطر دایره معادل	۲/۵۵	۲/۱۸	۱/۱۱	۰/۷۶	۱/۲۷	۱/۲۷	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۸۹	۲/۱۶	۳/۴۱	۶/۰۱

شبیه سازی سیلاب: با استفاده از مدل HEC-HMS و کاربرد داده های دو واقعه از پنج واقعه اندازه گیری شده از سال های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶، سیلاب برای زیرحوضه ها شبیه سازی شد. پس از انجام تحقیق، بر اساس روش و مراحل مختلف تحقیق به آن پرداخته شده، پس از معرفی مدل حوضه، مدل هواشناسی و مشخصه کنترل به نرم افزار با استفاده از داده های مشاهده شده بارش-رواناب به منظور حصول بهترین برازش بین آبگرد شبیه سازی شده و آبگرد مشاهده شده حوضه اقدام به واسنجی مدل شد. در این راستا، ابتدا آمار هیدرومتری دو ایستگاه موجود در خروجی زیرحوضه های گلستان (ایستگاه نهرا عظم) و پسکوهک (ایستگاه چنارسوخته)، آمار بارش ایستگاه ثبات قلات

و نیز بارش روزانه ایستگاه های باران سنجی موجود در منطقه از سازمان آب اخذ شد. داده های بارندگی باید دارای توزیع مکانی و زمانی در سطح حوزه آبخیز باشد. به منظور شبیه سازی بارش و رواناب و تعیین هیدروگراف سیلاب خروجی از حوضه از مدل HEC-HMS استفاده و سپس، واسنجی و ارزیابی مدل انجام شد (شکل ۳). برای شبیه سازی ابتدا مدل هواشناسی حوضه در نرم افزار HEC-HMS یکبار با وارد کردن میانگین گیری وزنی نقشه تبخیر-تعرق واقعی (ETa) حاصل از مدل SEBS و یکبار به صورت وارد کردن عدد تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ETo) تکمیل شد و سپس، پارامترهای لازم و مقادیر بارش متناظر با دوره بازگشت به مدل معرفی شد.



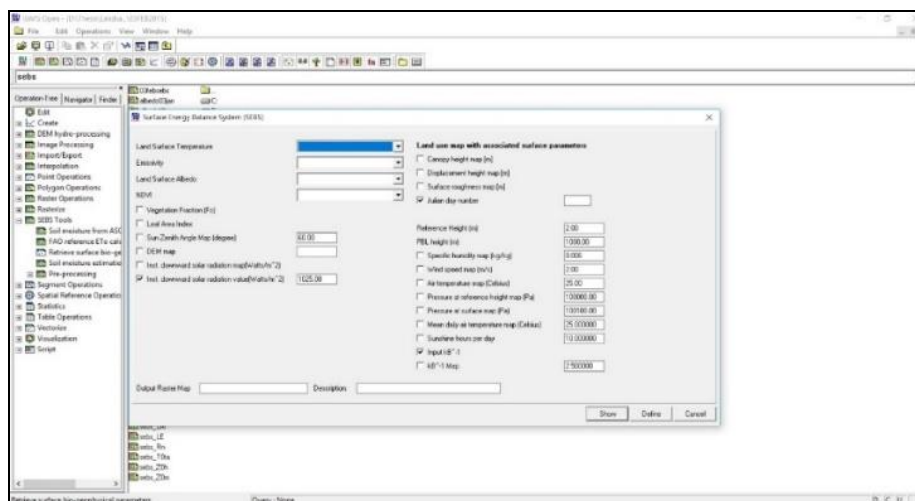
شکل ۳- شمایی از مدل حوضه در نرم‌افزار HEC-HMS

معتبر است، این فرض وجود داشت که این جایگزینی قدمی در راه بهبود تخمین مدل رواناب باشد. در نهایت، نتایج حاصل از مرحله واسنجی، اعتبارسنجی شد. تابع هدف مناسب، تابعی است که بتواند تا حد امکان هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی را به هم نزدیک کند. واسنجی مدل به کمک توابع هدف MAE، RMSE و RME مطالعه شد.

مدل توازن انرژی: در این مطالعه، روش بیلان انرژی برای محاسبه ET_a در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، از تصاویر ماهواره لندست استفاده شد. از مدل سبس نیز برای برآورد تغییرات زمانی و مکانی ET استفاده می‌شود. پوشش گیاهی، نوع و ارتفاع آن نیز با استفاده از بازدید زمینی، تعیین و از زبان اسکریپ‌نویسی موجود در نرم‌افزار الویس برای توسعه مدل تعادل انرژی بهره‌گیری شد. افزون بر داده‌های سنجش از دور، داده‌های هواشناسی ساعتی و نقشه‌های کاربری اراضی منطقه مورد نظر به‌عنوان ورودی مدل سبس (شکل ۴) به‌کار گرفته شد. از آنجا که در حال حاضر، تصاویر لندست ۸ به‌طور رایگان در اختیار استفاده‌کنندگان قرار می‌گیرد، به‌عنوان مبنا به‌کار گرفته شد. تصاویر مورد نیاز برای این پژوهش، تصاویر لندست ۸ مربوط به سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۶ (نه تصویر) است.

تحلیل حساسیت: تحلیل حساسیت روشی است که نشان می‌دهد، کدام یک از پارامترها تأثیرات شدیدتری بر نتایج اعمال می‌کنند. رتبه‌بندی پارامترهای مدل بر اساس مشارکت آن‌ها روی هم رفته در مدل قابل محاسبه است. تحلیل حساسیت می‌تواند در مقیاس کلی یا محلی انجام گیرد. در حال حاضر، تحلیل حساسیت نقش کلیدی در تحلیل‌های مربوط به سیلاب دارد و استفاده از آن برای تحلیل‌های کوتاه‌مدت تا بلندمدت خردمندانه است (Perrin و Oudin, ۲۰۰۷). برای این منظور، تحلیل حساسیت برای چهار پارامتر شماره منحنی، زمان تأخیر، درصد نفوذناپذیری و تلفات اولیه انجام گرفت.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژی در شبیه‌سازی جریان: واسنجی مدل HEC-HMS، با هدف افزایش همبستگی با داده‌های اندازه‌گیری شده دبی جریان در خروجی حوزه آبخیز انجام شد. در این راستا، به‌منظور تخمین سیلاب حوزه آبخیز با استفاده از تابع کمینه‌سازی مجموع مربعات باقی‌مانده نسبت به عملیات واسنجی اقدام شد. واسنجی در این تحقیق، بر اساس جایگزین کردن تبخیر-تعرق واقعی، که بر اساس نقشه پراکنش مکانی میانگین‌گیری شده بود، با تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_o) استوار بود. از آنجا که ET_o به‌طور نقطه‌ای و برای مکان ایستگاه هواشناسی



شکل ۴- نمایی از محیط سبیس در نرم‌افزار الویس

پنمن-مانتیس نیز به کمک داده‌های هواشناسی محاسبه خواهد شد. از آنجا که ضریب گیاهی Kc برای محدوده‌های آبی برابر واحد در نظر گرفته می‌شود، مقادیر ETa بایستی با ETo برابر باشد. هر گونه انحراف در این مقدار را باید در ضعف مدل جستجو کرد. این امکان در مدل سبیس وجود دارد که با تغییر در کد برنامه و اصلاح ضرایب معادلات آن، بیشینه تطابق را بین داده‌های ETa و ETo ایجاد کرد. بدین ترتیب مدل برای منطقه واسنجی خواهد شد. الگوریتم سبیس به‌وسیله Su (۲۰۰۲) پیشنهاد شده است و شامل یک سری ابزار برای تعیین پارامترهای فیزیکی سطح زمین مانند آبیبدو، انتشار سطح، دما و پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ و ارتفاع گیاهان است. در صورتی که اطلاعات گیاهی در دسترس نباشد، شاخص گیاهی و $NDVI$ به‌عنوان جانشین برای محاسبه پارامتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل سبیس از اطلاعات تصاویر رقومی جمع‌آوری شده به وسیله سنجنده لندست که تابش مادون قرمز حرارتی، تابش مرئی و تابش مادون قرمز نزدیک را از سطح زمین ثبت می‌کنند، استفاده می‌کند. دومین سری از داده‌های ورودی اطلاعات هواشناسی است که شامل فشار هوا، دمای هوای هواف رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع مرجع است. سومین سری از اطلاعات ورودی شامل تابش موج کوتاه ورودی و تابش موج بلند است. در سبیس سرعت اصطحاکاکی، شار گرمای محسوس و طول پارامتر ایوکوف به‌وسیله حل معادلات غیرخطی به‌دست می‌آید. کسر تبخیر بر اساس تعادل انرژی در

این تصاویر دارای نه نوار طیفی بازتابی با وضوح زمینی ۱۵ تا ۳۰ متر و دو نوار حرارتی ۱۰۰ متر بوده و در مقاطع زمانی ۱۶ روزه تکرار می‌شوند. تصاویر برای تمام مقاطع زمانی در دسترس که فاقد پوشش ابری باشد، از مرجع وبگاه مشترک ناسا و انجمن زمین‌شناسی آمریکا یا USGS دانلود شده، پس از بررسی کیفیت آن‌ها وارد چرخه پردازش اولیه شامل موارد زیر شد. اطلاعات ET باید از جزئیات زمانی و مکانی کافی برخوردار باشد تا بتوان تحلیل‌های صحیحی در سطح حوزه آبخیز ارائه کرد. تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند ابزاری بسیار عالی در تهیه نقشه ساختار فضایی و زمانی ETa باشند. در این مرحله، مدل اجرا شده و در صورت نیاز تلاش می‌شود، با تغییر معادلات آن نتایج به بیشینه انطباق با اندازه‌گیری‌ها برسد. حالت بهینه مدل، زمانی است که ارقام ETa برآوردی مدل برای مکان‌هایی که یک محدوده آبی نظیر استخر آبیاری با ارقام محاسبه شده بر اساس روش استاندارد فائو پنمن-مانتیس به بیشینه تشابه برسد. در واقع در نبود اندازه‌گیری‌های زمینی برای تبخیر-تعرق در سطح منطقه، مقادیر بیشینه تبخیر-تعرق برآورد شده با الگوریتم سبیس با بیشینه مقدار تبخیر-تعرق مرجع برآورد شده با معادله فائو پنمن-مانتیس در سطح منطقه مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور، ارقام ETa مدل برای پیکسل‌های یک محدوده آبی در همه نقشه‌های سری زمانی استخراج و به‌عنوان یک‌سری داده برآوردی ثبت شد. مقادیر ETo برای همان روزهای سری زمانی با روش استاندارد فائو

شار گرمای محسوس است. پارامترها در معادله (۲) برحسب وات بر متر مربع بیان می‌شوند. یک مزیت استفاده از روش بیلان انرژی نسبت به روش ET بالقوه این است که در این روش ETa سریع‌تر و بر اساس مقدار پوشش گیاهی محاسبه می‌شود، به طوری که کاهش ET که حاصل کمبود رطوبت خاک می‌باشد، به دست می‌آید. از جمله معایب شیوه بیلان انرژی این است که دقت محاسبه LE تنها به دقت برآورد مقادیر R_n ، H و G بستگی دارد. مدل سبیس سعی می‌کند تا بر این عیب با تمرکز بر کالیبراسیون داخلی نه بر LE بلکه بر H ، بر همه میانگین برآورد خطاها و ارزیابی‌ها فایق آید. در مدل سبیس، R_n با استفاده از مقادیر شار انعکاسی باندهای انعکاسی و دمای سطحی محاسبه شده از نوارهای حرارتی محاسبه می‌شود. مقدار G نیز با استفاده از R_n ، دمای سطحی و شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه می‌شود و H نیز از برآورد دامنه دمای سطحی، زبری سطح و سرعت باد با استفاده از تصحیحات ارشمیدس به دست می‌آید. داده‌های تشعشع خالص مورد نیاز مدل سبیس در محیط LINUX با استفاده از نرم‌افزار گراس تولید شد. داده‌های پوشش گیاهی شامل ارتفاع گیاه، تراکم پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ است. این داده‌ها را یا باید در فعالیت میدانی اندازه‌گیری کرد و یا بر اساس معادلاتی که در مدل SEBS تعبیه شده از روی شاخص NDVI تعیین کرد. از آنجا که نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان از حساسیت ناچیز مدل به این پارامترها دارد (van Der Kwast, ۲۰۰۹؛ Pakparvar, ۲۰۱۵)، نتیجه برآورد مدل از این پارامترها واجد دقت مناسب برای هدف تعیین ET هستند. داده‌هایی که از تصاویر ماهواره‌ای اخذ می‌شود، نظیر آلبدو، گسیلندگی (امیشن)، NDVI، دمای سطح زمین است که نحوه تهیه این داده‌ها به طور تفصیلی در منابع علمی آمده است (Su و همکاران، ۲۰۰۳؛ Pakparvar و همکاران، ۲۰۱۴).

نتایج و بحث

با توجه به اثر گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر رشد گیاهان، مراتع و جنگل‌ها و ایجاد وضعیت بهینه یا بحرانی جدید اقلیمی برای محصولات کشاورزی و

مولد محدود کننده انجام می‌شود و در نهایت، شار گرمای آشفته با استفاده از تعادل انرژی سطح مشخص می‌شود. در نهایت، ET روزانه با استفاده از کسر تبخیر که در طول روز ثابت فرض می‌شود و انرژی دسترس روزانه محاسبه می‌شود. برای اجرای سبیس و همچنین، مراحل قبل از آن نظیر محاسبه تشعشع، رطوبت مخصوص و ... به یکسری داده‌های هواشناسی از قبیل دما، ساعت آفتابی، سرعت باد و ... نیاز است. تمام داده‌های مذکور برای تاریخ‌های خاص هر تصویر به صورت روزانه و از ایستگاه خودکار هواشناسی واقع در داخل حوضه کَلستان و از سایت www.fieldclim.atte.com تهیه شد. قبل از اجرای SEBS نقشه تشعشع در محیط لینوکس و در نرم‌افزار گراس تولید و سایر ورودی‌های مورد نیاز از قبیل آلبدو، شاخص پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ، ارتفاع پوشش گیاهی، تراکم تاج پوشش گیاهی در محیط ILWIS تهیه شد. **تشریح مدل سبیس:** همان‌طور که بیان شد، مدل سبیس تبخیر-تعرق واقعی را محاسبه می‌کند، در حالی که مدل فائو پنمن-مانتیس تبخیر-تعرق پتانسیل را به دست می‌آورد (معادله ۱).

$$E_{Ta} = E_{To} \cdot K_a \cdot K_s \quad (1)$$

که در آن، K_a ضریب گیاهی، K_s ضریب استرس است. مقادیر K_a و K_s در پهنه یک پیکر آبی برابر یک در نظر گرفته شده، در نتیجه مقدار E_{To} با E_{Ta} برابر خواهد بود. در نتیجه برای مقایسه نتایج مدل با واقعیت بایستی منطقه‌ای مثل استخرها و دریاچه انتخاب شود که دارای پوشش آبی باشد. برای برآورد E_{Ta} با استفاده از مدل سبیس، نیاز به تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی می‌باشد. اساس نظری و محاسباتی مدل سبیس به وسیله Su (۲۰۰۲) شرح داده شده است. به طور کلی، در مدل سبیس تبخیر-تعرق (ET) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و با به کارگیری معادله بیلان انرژی در سطح تعیین می‌شود. به طوری که انرژی مصرف شده به وسیله ET به عنوان باقی مانده‌ای از معادله انرژی سطحی محاسبه می‌شود.

$$LE = R_n - G - H \quad (2)$$

که در آن، LE شار گرمای نهان، R_n شار تابش خالص (بیلان تابش موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی در سطح زمین)، G شار گرمای خاک و H

به صورت پیکسل به پیکسل در زمان اخذ تصویر ماهواره‌ای و برای هر تصویر محاسبه شود. نتایج به دست آمده در تحقیق نشانگر آن است که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبب ابزار مناسبی برای تبخیر-تعرق واقعی بوده است. نتایج مقایسه ETo محاسباتی با روش فائو پنمن-مانتیس با Eta مدل سبب در جدول ۲ ارائه شده است. حالت بهینه مدل زمانی است که ارقام Eta برآوردی مدل برای مکان‌هایی که یک محدوده آبی نظیر استخر آبیاری با ارقام محاسبه شده بر اساس روش استاندارد فائو پنمن-مانتیس به بیشینه تشابه برسد. از آنجایی که این مطالعه در سایتی انجام شد که داده‌های Eta (زمینی) برای مقایسه با Eta شبیه‌سازی شده قابل برداشت از سطح زمین نبود، با استفاده از مدل فائو پنمن-مانتیس، از داده‌های ETo به عنوان شاهد تبخیر-تعرق در منطقه مورد مطالعه و بر اساس دلایل زیر استفاده شد. چنانچه ملاحظه می‌شود، میزان ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در حد ۰/۰۵۴ میلی‌متر در روز است که در محاسبات تبخیر-تعرق کاملاً خطای ناچیزی است.

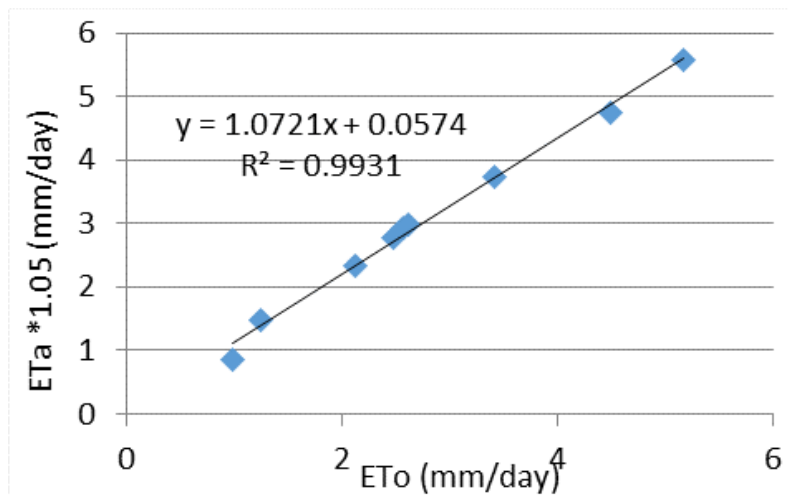
نیز کمبود امکانات مانند لایسیمترها برای محاسبه مستقیم تبخیر-تعرق واقعی، به نظر می‌رسد، پیدا کردن روش‌های غیرمستقیم مانند استفاده از سنجش از دور می‌تواند گامی سودمند برای نیاز آبی محسوب شود. امروزه به‌طور فزاینده از مدل‌های ریاضی به‌عنوان ابزاری موثر برای شبیه‌سازی و مدیریت بهینه منابع آب استفاده می‌شود. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای محاسبه تبخیر-تعرق، دارای کاربردهای گوناگونی از جمله بررسی کارایی آب در اراضی کشاورزی، بررسی بیلان حوضه و مدیریت توسعه آبیاری است. مدل سبب از اطلاعات تصاویر رقومی جمع‌آوری شده به‌وسیله سنجنده ASTER و دیگر سنجنده‌ها (دارای تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا) که تابش مادون قرمز حرارتی، تابش مرئی و تابش مادون قرمز نزدیک را از سطح زمین ثبت می‌کنند، استفاده می‌کند. پایش مستمر مقدار مصرف آب برای پروژه‌های آبی از نقطه نظر مدیریت حقایقه‌ها، برنامه‌ریزی آبیاری، افزایش بهره‌وری آب و تنظیم بیلان هیدرولوژیک آب حوضه مهم است. در این پژوهش، سعی شد تا مقادیر تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از مدل توازن انرژی سبب و

جدول ۲- مقایسه تبخیر-تعرق به دست آمده از الگوریتم سبب و معادله فائو پنمن-مانتیس

تاریخ	تبخیر-تعرق واقعی (mmday ⁻¹)	تبخیر-تعرق پتانسیل (mmday ⁻¹)
۸ فروردین ۱۳۹۶	۴/۴۹	۴/۵۱
۲۰ بهمن ۱۳۹۵	۲/۶۱	۲/۸۴
۶ اسفند ۱۳۹۵	۳/۴۱	۳/۵۶
۱۵ دی ۱۳۹۴	۰/۹۸	۰/۸۲
۲۸ دی ۱۳۹۳	۲/۱۳	۲/۲۱
۱۴ بهمن ۱۳۹۳	۱/۲۴	۱/۴۱
۱ بهمن ۱۳۹۴	۲/۴۷	۲/۶۳
۱۷ بهمن ۱۳۹۴	۲/۵۷	۲/۷۹

این تحقیق برای برآورد تبخیر-تعرق در منطقه پخش سیلاب دشت گربایگان استان فارس استفاده کردند. نتایج به دست آمده به دلیل منطقه آبی مناسب برای برداشت داده‌ها با داده‌های واقعی هماهنگی زیادی دارد. حالت بهینه مدل زمانی است که ارقام Eta برآوردی مدل برای مکان‌هایی که یک محدوده آبی نظیر مخزن سد و یا استخرهای بزرگ آبیاری با ارقام محاسبه شده بر اساس روش استاندارد فائو پنمن-مانتیس به بیشینه تشابه برسد.

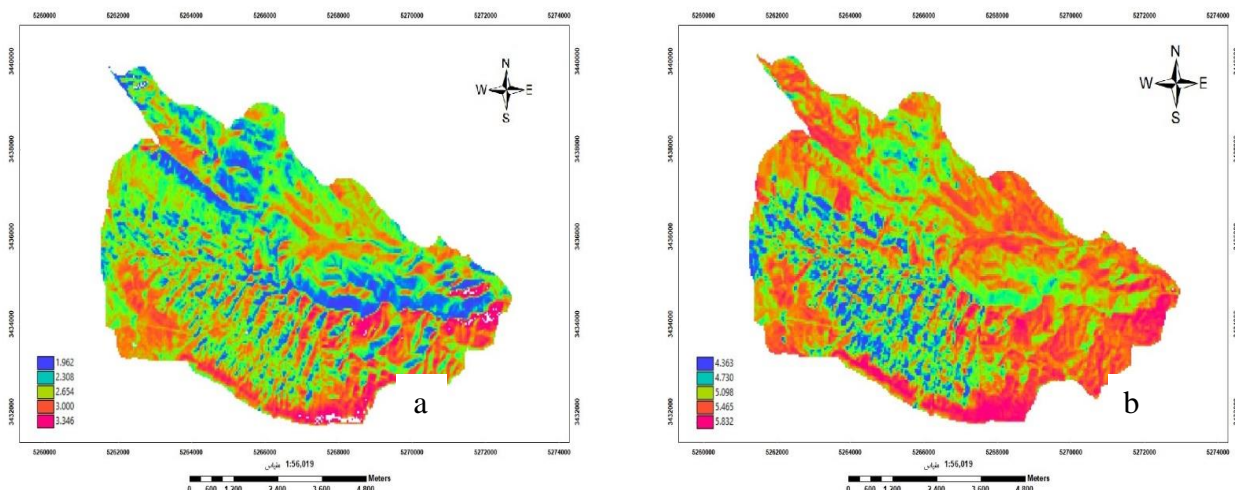
مقایسه‌ای از ضریب رگرسیون سبب با معادله فائو پنمن-مانتیس در شکل ۵ انجام شده است. مقایسه بین مقادیر تخمین زده شده به‌وسیله الگوریتم سنجش از دور سبب و تبخیر-تعرق پتانسیل فائو پنمن-مانتیس نشان می‌دهد که بین مقادیر تخمین زده شده به‌وسیله این الگوریتم و روش فائو پنمن-مانتیس همانطور که مشاهده می‌کنید، ضریب R^2 نزدیک به یک است و همبستگی بالای داده‌ها را نشان می‌دهد. Pakparvar و همکاران (۲۰۱۴) از روشی مشابه روش



شکل ۵- مقایسه‌ای از ضریب رگرسیون سبب با معادله فائو پنمن-مانتیس

سنجش از دور اصولاً از بالانس انرژی برای تخمین ET استفاده می‌کنند. ET یکی از مولفه‌های اصلی بیلان آب هر منطقه و همچنین، یکی از عوامل کلیدی برای برنامه‌ریزی درست و مناسب آبیاری برای بهبود راندمان آب مصرفی در اراضی است (Allen و همکاران، ۲۰۰۳). برای این منظور، ارقام ETa مدل برای پیکسل‌های یک محدوده آبی در همه نقشه‌های سری زمانی استخراج و به‌عنوان یک‌سری داده برآوردی ثبت شد. مقادیر ETo برای همان روزهای سری زمانی با روش استاندارد فائو پنمن-مانتیس نیز به کمک داده‌های هواشناسی محاسبه شد. از آنجا که ضریب گیاهی Kc برای محدوده‌های آبی برابر واحد در نظر گرفته می‌شود، مقادیر ETa بایستی با ETo برابر باشد. هر گونه انحراف در این مقدار را باید در ضعف مدل جستجو کرد. این امکان در مدل SEBS وجود دارد که با تغییر در کد برنامه و اصلاح ضرایب معادلات آن، بیشینه تطابق را بین داده‌های ETa و ETo ایجاد کرد. بدین‌ترتیب مدل برای منطقه واسنجی شد. از طرف دیگر، ET نقش قابل ملاحظه‌ای در اقلیم جهانی از طریق چرخه هیدرولوژی ایفا کرده، تخمین آن کاربردهای مهمی در پیش‌بینی رواناب (Kustas و Norman، ۱۹۹۹)، طراحی کانال‌های آبیاری (Bastiaanssen و همکاران، ۲۰۰۲) همچنین، بر روی بلاهای طبیعی نظیر خشکسالی موثر است (Aghdasi، ۲۰۱۰).

تبخیر-تعرق واقعی محدوده مورد مطالعه حاصل از الگوریتم سبب برای دو تاریخ از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در شکل ۶ آورده شده است. نقشه ETa حاصل از سبب برای مطالعه پراکنش مکانی تبخیر-تعرق در منطقه مورد مطالعه بسیار مفید است. در روش‌هایی مانند معادله فائو پنمن-مانتیس و تشتک تبخیر اطلاعات در حد یک نقطه در ایستگاه هواشناسی است و اطلاعاتی از چگونگی پراکندگی مکانی آن و نیز میزان تبخیر-تعرق در کاربری‌های مختلف مثل کشاورزی و خاک وجود ندارد. همچنین، روش‌های محاسبه‌ای مانند معادله فائو پنمن-مانتیس، تبخیر-تعرق پتانسیل را در اختیار محقق قرار می‌دهند و از تبخیر-تعرق واقعی آگاهی کافی به آن‌ها نمی‌رسد. اندازه‌گیری ETa نیازمند آزمایشات پرهزینه و زمان‌بری است تا Ka و Ks برای هر نوع پوشش گیاهی به‌دست آید. اما کاربرد روش‌های مبتنی بر سنجش از دور مانند سبب مستقیماً عدد ETa را می‌دهند. آگاهی از میزان وقوع سیلاب و بررسی رفتار آن نیازمند وجود آمار کافی از وضعیت هیدرولوژیک حوضه و دبی رودخانه است که تحقق این هدف در رودخانه‌های فصلی و مناطق فاقد جریانات دائمی مقدور نمی‌باشد. لذا، کاربرد مدل‌های هیدرولوژیک به‌منظور شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب و مدل‌های هیدرولیک برای تحلیل جریان رواناب در رودخانه و بررسی نحوه گسترش آن سودمند است. تکنیک‌های



شکل ۶- ETa برآورده شده با الگوریتم سبس تاریخ ۲۰ بهمن ۱۳۹۵ (a)، ETa برآورده شده با الگوریتم سبس تاریخ ۲۴ فروردین ۱۳۹۶ (b)

می‌تواند مبنای تصمیمات برنامه‌ریزی و مدیریت قرار گیرد. وجود الگوریتم‌ها و روش‌های متعدد و متفاوت برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و از طرفی، تولید روش‌های جدید که برخی دارای تفاوت‌های بسیار با الگوریتم‌های پیشین هستند، نشان می‌دهد، تکنولوژی سنجش از دور گرچه با سرعت زیادی در حال پیشرفت است، اما هنوز راه زیادی تا تکامل در پیش رو دارد. بنابراین، ضروری است تا روش‌های موجود به‌دقت مورد بررسی قرار گرفته، روش‌های جدیدتر همراه با دقت برآورد بهتری ارائه شوند. به‌علاوه، تفاوت‌های بین تبخیر-تعرق واقعی (ETa) و تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ETo)، به‌عنوان یک شاخص کمبود آب، در قدرت تفکیک مکانی بالا در بسیاری از کاربردها از جمله کشاورزی و منابع آب مورد توجه است. طی فرایند ET، حجم بالایی از آب خاک سطحی به‌صورت تبخیر و آب خاک زیرسطحی از طریق پوشش گیاهی و به‌صورت تعرق به اتمسفر انتقال داده می‌شود. همچنین، رطوبت خاک (قابل برآورد به کمک ETa) یک ورودی با ارزش برای مدل‌های بارش-رواناب می‌باشد. به بیانی جامع‌تر، سنجش از دور با بهره‌گیری از الگوریتم‌های متعدد با ارائه تخمینی از میزان ETa با کمینه استفاده از داده‌های زمینی، دارای پتانسیلی بسیار بالا برای ارتقاء مدیریت منابع آب در مناطق بسیار وسیع است. امروزه

بنابراین، با توجه به اهمیت ET لازم است، این پارامتر حتی‌الامکان به‌طور دقیق برآورد شود. ET تابعی از ویژگی‌های خاک، آب و هوایی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و توپوگرافی منطقه است که این پارامترها در زمان و مکان متغیر هستند (Parlang, 1995). بنابراین، مقدار ET به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت بیشتری برخوردار است. این پژوهش آشکار می‌سازد که تلفیق مدل‌های بیوفیزیک و سنجش از دور از یک سو و مدل‌های هیدرولوژیک می‌تواند تاثیر به‌سزایی در افزایش دقت نتایج این مدل‌ها داشته، از آن‌ها ابزار کارآمدتری برای شبیه‌سازی اثرات اقلیمی، تغییر کاربری اراضی و پوشش گیاهی بر روی رژیم سیلابی حوزه‌های آبخیز، به‌منظور مدیریت کارآمد سیلاب بسازد. استفاده از مدل‌های بارش رواناب یکی از روش‌های محاسبه داده‌های جریان در بسیاری از پروژه‌های مهندسی منابع آب است. از طرفی، مدل‌ها به‌طور عام دارای ساختار پیچیده و معادلات غیرخطی هستند. به‌همین دلیل شبیه‌سازی روند بارش رواناب بسیار مشکل بوده، نیاز به یک مدل دقیق و در عین حال ساده برای شبیه‌سازی داده‌های جریان آب ضروری است. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، نشانگر آن است که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم سبس ابزار مناسبی برای برآورد ETa بوده، نتایج به‌دست آمده

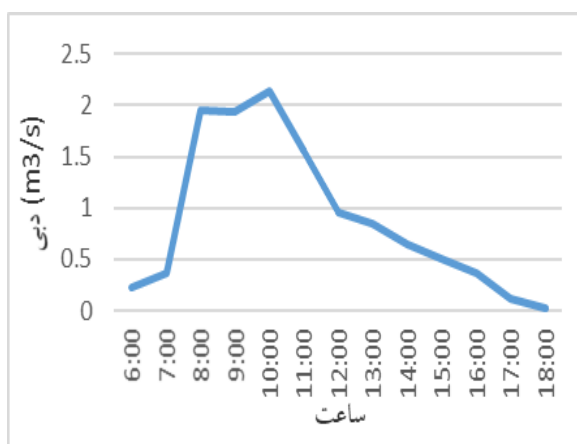
تصاویر ماهواره‌ای با مزایایی که دارد، بهترین روش در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در این منطقه می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت حذف پیکره‌های آبی در تصاویر سنجنده لندست ۸ همواره بین داده‌های دمای سطح زمین رابطه معکوس خطی و غیرخطی NDVI و شاخص گیاهی وجود دارد. برای تعیین پارامترهای مناسب برای واسنجی مدل، از تحلیل حساسیت استفاده شد که در این بین شماره منحنی و تلفات اولیه، بیشترین حساسیت را دارا بودند. مشخصات دو واقعه بارش، برای واسنجی مدل حوضه در جدول ۳ آورده شده است.

آمار باران و بده اندازه‌گیری شده واقعه‌ها، در شکل‌های زیر نشان داده شده است (شکل‌های ۷ و ۸).

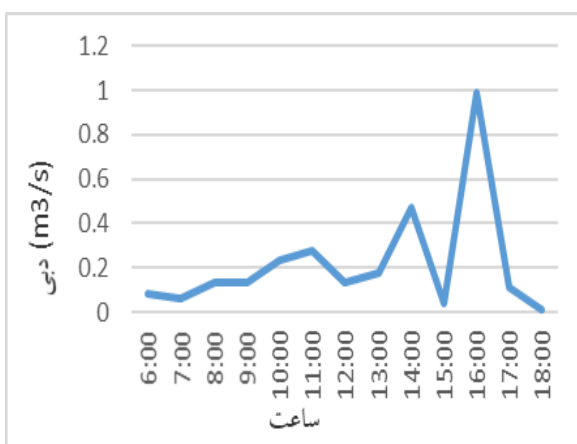
به‌طور فزاینده از مدل‌های ریاضی به‌عنوان ابزاری موثر برای شبیه‌سازی و مدیریت بهینه منابع آب استفاده می‌شود. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای محاسبه تبخیر-تعرق، دارای کاربردهای گوناگونی از جمله بررسی کارایی آب در اراضی کشاورزی، بررسی بیلان حوضه و مدیریت توسعه آبیاری است. فرایند تبخیر-تعرق وابسته به مقدار انرژی در دسترس است. اما مشکل اصلی در استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ این است که هر ۱۶ روز یک‌بار از نقطه محل اجرای طرح عبور می‌کند و با این روش نمی‌توان برای تعداد روزهای بیشتری از دوره رشد، تبخیر-تعرق را برآورد کرد، اگر بتوان در آینده این مشکل به‌طریقی حل شود، به‌طوری‌که بتوان در هر مرحله از رشد تصاویر بیشتری دریافت کرد، می‌توان گفت که استفاده از

جدول ۳- مشخصات رخدادهای بارش انتخابی برای واسنجی مدل حوضه و مقادیر محاسباتی و واسنجی شده پارامترها

تاریخ	۲۰ بهمن ۱۳۹۵	۲۴ فروردین ۱۳۹۶
شرایط رطوبت پیشین	II	II
شماره منحنی	۸۰/۰۲	۸۲/۰۴
تلفات بارش (میلی‌متر)	۶۳/۴۲	۶۴/۵۱
تلفات اولیه محاسبه شده (میلی‌متر)	۱۲/۶۸	۱۳/۷۲
تلفات اولیه واسنجی شده (میلی‌متر)	۴۰/۹	۴۳/۰۱
زمان تاخیر محاسبه شده (دقیقه)	۳۴۰	۳۴۰
زمان تاخیر واسنجی شده (دقیقه)	۴۵۰	۴۵۰



شکل ۸- باران و بده اندازه‌گیری شده در واقعه ۲۴ فروردین ۱۳۹۶



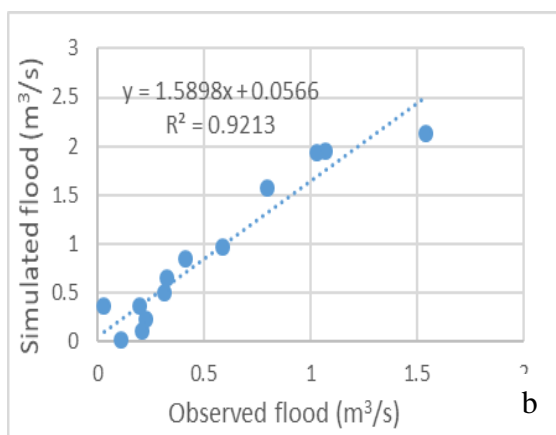
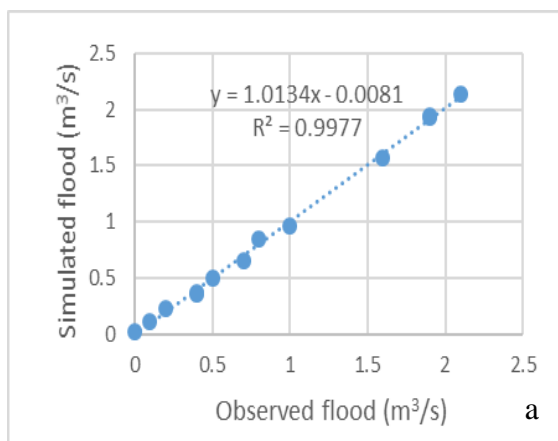
شکل ۷- باران و بده اندازه‌گیری شده در واقعه ۲۰ بهمن ۱۳۹۵

است. مقادیر شبیه‌سازی شده با ETa و ETo با مقادیر محاسبه شده با استفاده از سیل‌های مشاهداتی در خروجی حوضه، مقایسه شد. میزان خطای شبیه‌سازی در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی با توجه به معیارهای MAE، RMSE و RME محاسبه شد

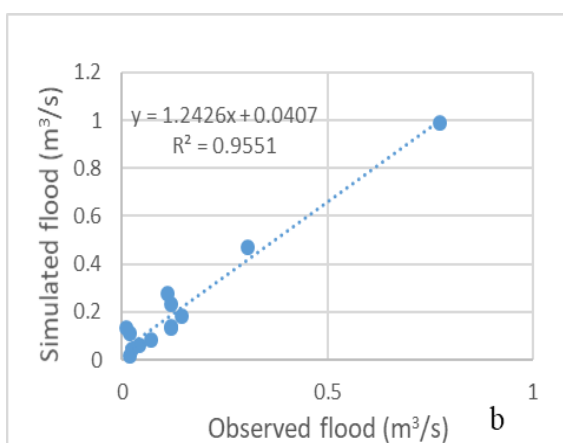
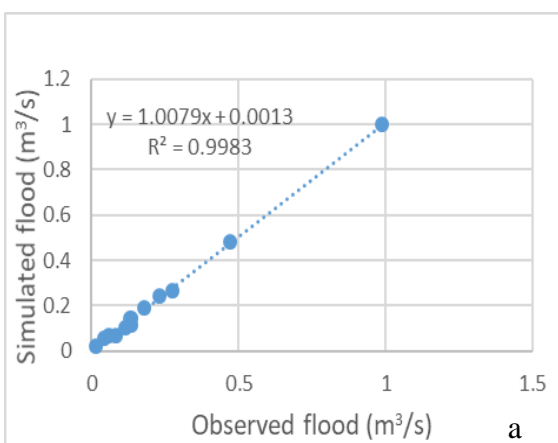
با استفاده از مدل HEC-HMS و داده‌های ETa و ETo برای دو واقعه مذکور سیلاب برای حوزه آبخیز گلستان شبیه‌سازی شد. مقایسه بده سیلاب دو رخداد از پنج رخداد اندازه‌گیری شده با میزان شبیه‌سازی شده ETa و ETo در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده

HMS استفاده شده است. این مدل ضمن به‌کارگیری تمامی عوامل مؤثر در ایجاد سیلاب شامل مشخصات فیزیکی حوضه، خاک، پوشش گیاهی و نوع کاربری اراضی در مدل محاسباتی، سیلاب حوضه آبخیز را با دید جامع و ترکیبی از تأثیر کلیه عوامل مؤثر، شبیه‌سازی می‌کند. رفتار مدل ساخته شده در حقیقت، بیانگر انعکاس واقعی حوضه در شرایط طبیعی است. این موضوع، امکان به‌کارگیری گزینه‌های مختلف مدیریتی و بررسی تأثیر آن‌ها را در تغییر رفتار حوضه فراهم کرده است. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS، همبستگی مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دبی جریان در خروجی حوضه آبخیز از خود نشان می‌دهد. مقادیر شاخص‌های کارایی مدل در این تحقیق شامل شاخص ناش-سائکلیف و اریبی مدل در برآورد حجم جریان در حد قابل قبولی است.

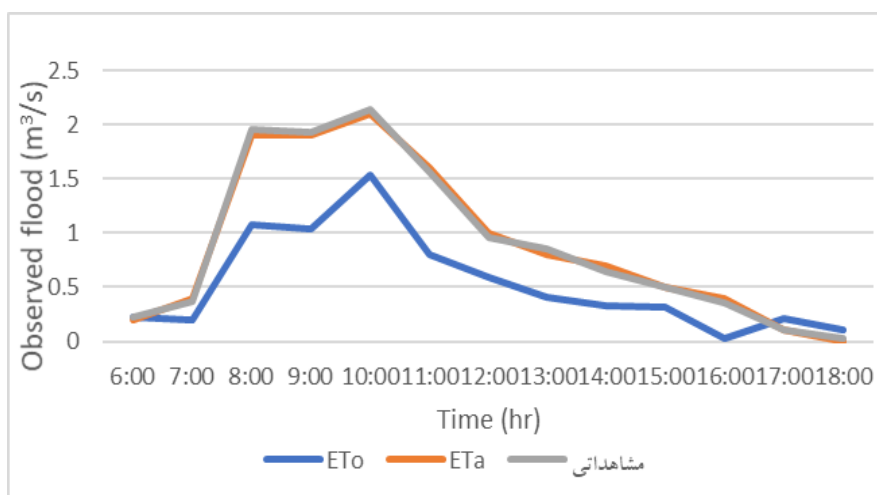
(جدول ۴). تحلیل حساسیت مدل نسبت به متغیرهای مختلف نیز مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هر دو مدل قابلیت خوبی در تخمین دبی سیلابی دارند، اما نکته قابل توجه در این پژوهش، رابطه سیلاب مشاهداتی و مدل با در نظر گرفتن تبخیر-تعرق واقعی است که دقیق‌ترین شبیه‌سازی جریان سیلاب را انجام داده، دارای کمترین خطا در مقایسه با سایر روش‌های روندیابی سیلاب است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد، مدل در برآورد پیک سیلاب دقت بیشتری نسبت به برآورد حجم سیلاب دارد و نسبت به دو پارامتر تلفات اولیه و شماره منحنی بیشترین حساسیت را دارد. در این تحقیق، به‌منظور بررسی رفتار حوضه و شبیه‌سازی سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف از نرم‌افزار تحت ویندوز HEC-



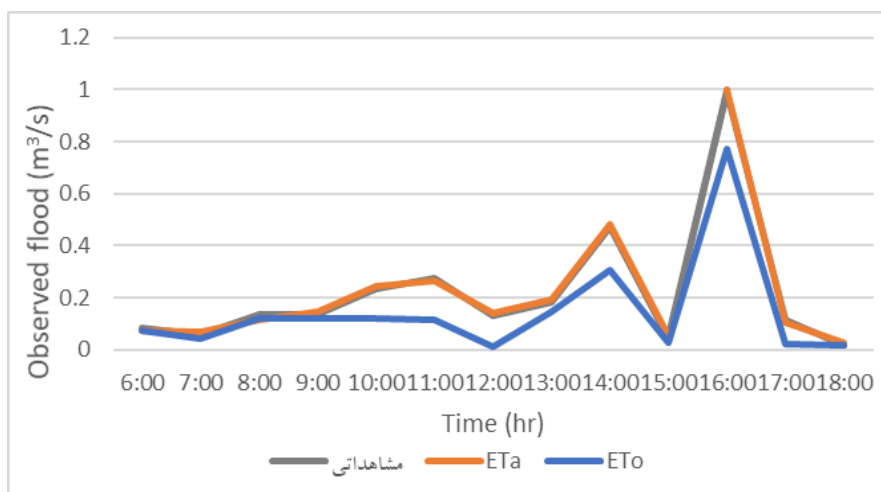
شکل ۹- رابطه سیلاب مشاهداتی با مدل در دو حالت تبخیر-تعرق واقعی ETa (a) و پتانسیل ETo (b) در واقعه ۲۰ بهمن ۱۳۹۵



شکل ۱۰- رابطه سیلاب مشاهداتی با مدل در دو حالت تبخیر-تعرق واقعی ETa (a) و پتانسیل ETo (b) در واقعه ۲۴ فروردین ۱۳۹۶



شکل ۱۱- مقایسه دبی‌های مشاهداتی، دبی حاصل از مدل HEC-HMS (ETo) و دبی با در نظر گرفتن تبخیر-تعرق واقعی (ETa) در واقعه ۲۰ بهمن ۱۳۹۵



شکل ۱۲- مقایسه دبی‌های مشاهداتی، دبی حاصل از مدل HEC-HMS (ETo) و دبی با در نظر گرفتن تبخیر-تعرق واقعی (ETa) در واقعه ۲۴ فروردین ۱۳۹۶

جدول ۴- خطای شبیه‌سازی در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی

ETa	ETo	واقعه
۰/۰۰۴	۰/۰۳	۲۴ فروردین ۱۳۹۶
۰/۰۱	۰/۱۴	۲۰ بهمن ۱۳۹۵

دقت مدل مورد استفاده در پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک را فراهم می‌آورد. این نتایج، با نتایج تحقیقات Su و همکاران (۲۰۰۳)، Enko (۲۰۰۹) و Pakparvar (۲۰۱۵) درباره دقت مدل SEBS برای برآورد تبخیر-تعرق واقعی هم‌خوانی دارد. دقت نتایج حاصل از این پژوهش، نتایج Han و Yang (۲۰۰۴)، مبنی بر دقت متوسط در تخمین تبخیر-تعرق روش‌های سنجش از دور در الگوهای مختلف را رد می‌کند. همچنین، نتایج تحقیقات Allen و همکاران

می‌توان گفت که مدل مورد استفاده برآورد خوبی از مؤلفه‌های هیدروگراف جریان داشته است و تنها در برآورد حجم جریان و همچنین، پیش‌بینی در شاخه نزولی از توفیق کمتری برخوردار بوده است. دلیل آن را می‌توان به پایین بودن کارایی مدل در برآورد ذخایر حوضه مرتبط دانست که انجام مطالعات دقیق‌تر در این خصوص توصیه می‌شود. مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، امکان ارزیابی کلی

تحقیق Kathol و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که بر اساس معیارهای نکویی برازش محاسبه شده به وسیله مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS کارایی بالایی در شبیه سازی سیلاب های تاریخی با دوره بازگشت بیش از ۵۰۰ سال را ندارد. همچنین، پارامترهای واسنجی شده به وسیله این مدل (مانند زمان تمرکز، شماره منحنی و زمان تأخیر) نزدیک به مقادیر تخمین زده شده به وسیله روش های تجربی نیست. در تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف مشخص شد که مدل نسبت به تلفات اولیه بیشترین حساسیت را دارد. داده های این تحقیق که بر اساس روش به کار رفته در مقالات معتبر دیگر انجام شده، این مقدار از انطباق بین این دو روش را نشان داده است. ممکن است، تصور شود که خود روش استاندارد فائو پنمن-مانتیس نیز ممکن است، دارای خطا باشد، اما با توجه به پایه فیزیکی آن و تاییدات بسیار زیادی که در جاهای مختلف دنیا از اجرای آن به دست آمده، می تواند مبنای این قضاوت قرار گیرد. بی تردید اگر داده های لایسیمتری در دسترس بود، با قاطعیت بیشتری مورد قضاوت قرار می گرفت. اما انطباق کاملی که از نتایج دو روش حاصل شده است، به حد کافی بر صحت نتایج مدل به ویژه برای کاربردهای هیدرولوژیکی صحت می گذارد. مواردی که جهت انجام مطالعات آتی پیشنهاد می شود، در ادامه ارائه شده است.

۱- تأسیس امکاناتی از جمله لایسیمتر و برج های اندازه گیری شارهای سطحی (ادی کوواریانس)، به منظور ارزیابی روش های موجود برآورد تبخیر-تعرق واقعی مبتنی بر تکنیک سنجش از دور در منطقه

۲- از آنجا که مشاهدات صحرائی نشان داد که اراضی با شرایط متفاوت، زمان آغاز و میزان رواناب آن متفاوت است، بنابراین، برای تعیین دقیق اثر عملیات آبخیزداری بر سیل و چگونگی رفتار زیرحوضه ها، اندازه گیری رواناب در قطعاتی از اراضی با شرایط مختلف ضروری است.

(۲۰۰۳)، Pakparvr و همکاران (۲۰۱۴) و Singh و Senay (۲۰۱۵) را درباره دقت روش SEBS را تایید می کند. بر اساس نتایج به دست آمده، با وجود تفاوت های اندک در دو روش مورد استفاده، تبخیر-تعرق واقعی حاصل از مدل SEBS در برابر تبخیر-تعرق پتانسیل حاصل از معادله فائو پنمن-مانتیس، برتری قابل ملاحظه ای داشت که این نتایج با نتایج تحقیقات McCabe و Wood (۲۰۰۶)، van der Kwast و همکاران (۲۰۰۶) و Lu و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد. در مجموع می توان گفت که نتایج مدل مورد استفاده با دقت قابل قبولی در شبیه سازی جریان آبخیز کستان قابل اعتماد است که با تحقیقات Doan (۲۰۰۰)، Knebl و همکاران (۲۰۰۵)، Dastorani و همکاران (۲۰۱۱) و Joo و همکاران (۲۰۱۴) در زمینه کارایی مناسب مدل HEC-HMS در شبیه سازی هیدروگراف جریان هم راستا می باشد. نتایج استفاده از این مدل در حوزه آبخیز کستان بیانگر قابلیت مدل در برآورد دبی پیک سیل است که با نتایج ارائه شده به وسیله Kamali و همکاران (۲۰۱۳) و Kathol و همکاران (۲۰۰۳) هم خوانی دارد. این مدل، در برآورد حجم سیل در این حوضه کارایی لازم را ندارد که این موضوع ممکن است به کیفیت داده ها (برداشت داده سیل به وسیله متصدی و به صورت دستی، عدم پراکنش صحیح ایستگاه باران سنج ثبات در سطح حوضه) مربوط باشد که با نتیجه تحقیق Doan (۲۰۰۰) هم خوانی دارد. مقدار CN محاسبه شده با استفاده از نقشه، تقریباً با میزان به دست آمده پس از واسنجی مدل در حوزه آبخیز کستان یکسان است که با نتیجه به دست آمده به وسیله Tokar و همکاران (۲۰۰۰) که در مرحله تحلیل حساسیت در روش شماره منحنی، که بین دو پارامتر شماره منحنی و زمان تأخیر صورت گرفت، پارامتر شماره منحنی با داشتن بیشترین شیب، پارامتر حساس تعیین شد، هم خوانی و با نتیجه ارائه شده به وسیله Kathol و همکاران (۲۰۰۳) مغایرت دارد. نتایج به دست آمده از

منابع مورد استفاده

1. Aghdasi, F. 2010. Crop water requirement assessment and annual planning of water allocation. University of Twente, Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC), 72 pages.

2. Bansouleh, V.F., K. Khalil Valizadeh and M. Pirnazar. 2015. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS: comparison between split window algorithm and SEBAL method. Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment, 953503-953503-953512.
3. Bastiaanssen, W., M. Menenti, R. Feddes and A. Holtslag. 1998. A remote sensing Surface Energy Balance Algorithm For Land (SEBAL). *Journal of Hydrology*, 212: 198-212.
4. Bastiaanssen, W., E. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B. Thoreson and R. Allen. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1): 85-93.
5. Bastiaanssen, W.G., M.U.D. Ahmad and Y. Chemin. 2002. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resources Research*, 38(12): 25-39.
6. Brooks, K., H. Gregersen, E. Berglund and M. Tayaa. 1982. Economic evaluation of watershed projects-an overview methodology and application. *Journal of the American Water Resources Association*, 18(2): 245-250.
7. Chang, J.X., T. Bai, Q. Huang and D.W. Yang. 2013. Optimization of water resources utilization by PSO-GA. *Water Resources Management*, 27(10): 3525-3540.
8. Chen, X., Z. Su, Y. Ma, K. Yang, J. Wen and Y. Zhang. 2013. An improvement of roughness height parameterization of the Surface Energy Balance System (SEBS) over the Tibetan Plateau. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(3): 607-622.
9. Dastorani, M.T., R. Khodaparast, A. Talebi, M. Vafakhah and J. Dashti. 2011. Determination of the ability of HEC-HMS model components in rainfall-runoff simulation. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5(10): 790-800.
10. Doan, J. 2000. Geospatial hydrologic modeling extension HEC-GeoHMS user's manual, version 1.0. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, California, USA.
11. Enko, T. 2009. Estimation of evapotranspiration from satellite remote sensing and meteorological data over the Fogera Floodplain, Ethiopia. MSc Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands, 156 pages.
12. Gibson, L., C. Jarmain, Z. Su, and F. Eckardt. 2013. Estimating evapotranspiration using remote sensing and the surface energy balance system, a South African perspective. *Energies*, 39(4): 477-484.
13. Gokmen, M., Z. Vekerdy, A. Verhoef, W. Verhoef, O. Batelaan and C. Van der Tol. 2012. Integration of soil moisture in SEBS for improving evapotranspiration estimation under water stress conditions. *Remote Sensing of Environment*, 121: 261-274.
14. Gowda, P.H., T.A. Howell, G. Paul, P.D. Colaizzi, T.H. Marek, B. Su and K.S. Copeland. 2013. Deriving hourly evapotranspiration rates with SEBS: a lysimetric evaluation. *Vadose Zone Journal*, 12: 25-37.
15. Han, H. and L. Yang. 2004. Evaluation of regional scale evapotranspiration using SEBS model in western Chinese Loess Plateau. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2: 1339-1342.
16. Joo, J., T. Kjeldsen, H.J. Kim and H. Lee. 2014. A comparison of two event-based flood models (ReFH-rainfall runoff model and HEC-HMS) at two Korean catchments, Bukil and Jeungpyeong. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(1): 330-343.
17. Kustas, W.P., M.S. Moran, K.S. Humes, D.I. Stannard, P. Pinter, L.E. Hippias, E. Swiatek and D.C. Goodrich. 1994. Surface energy balance estimates at local and regional scales using optical remote sensing from an aircraft platform and atmospheric data collected over semiarid rangelands. *Water Resources Research*, 30(5): 1241-1259.
18. Kamanbedast, A. and Y. Esfandiari. 2011. Investigation and study of morphological changing of rivers using HEC-GeoRAS and Mike 11 Software. *World Applied Sciences Journal*, 13(5): 1253-1258.
19. Kustas, W.P. and J.M. Norman. 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(1): 13-29.
20. Kamali, B., S.J. Mousavi and K. Abbaspour. 2013. Automatic calibration of HEC-HMS using single-objective and multi-objective PSO algorithms. *Hydrological Processes*, 27(26): 4028-4042.
21. Knebl, M., Z.L. Yang, K. Hutchison and D. Maidment. 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS, a case study for the San Antonio River Basin summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4): 325-336.
22. Lu, J., Z.L. Li, R. Tang, B.H. Tang, H. Wu, F. Yang, J. Labeled and G. Zhou. 2013. Evaluating the SEBS-estimated evaporative fraction from MODIS data for a complex underlying surface. *Hydrological Processes*, 27(22): 3139-3149.

23. Mahour, M., A. Stein, A. Sharifi and V. Tolpekin. 2015. Integrating super resolution mapping and SEBS modeling for evapotranspiration mapping at the field scale. *Precision Agriculture*, 16(5): 571-586.
24. McCabe, M.F. and E.F. Wood. 2006. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, 105(4): 271-285.
25. Pakparvar, M., W. Cornelis, L. Pereira, D. Gabriels, H. Hosseinimarandi, M. Edraki and S. Kowsar. 2014. Remote sensing estimation of actual evapotranspiration and crop coefficients for a multiple land use arid landscape of southern Iran with limited available data. *Journal of Hydroinformatics*, 16(6): 1441-1460.
26. Parlange, M.B., W.E. Eichinger and J.D. Albertson. 1995. Regional scale evaporation and the atmospheric boundary layer. *Reviews of Geophysics*, 33(1): 99-124.
27. Perrin, C. and L. Oudin. 2007. Impact of stream flow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal*, 52: 25-38.
28. Roerink, G., Z. Su and M. Menenti. 2000. S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2): 147-157.
29. Su, Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1): 85-99.
30. Su, Z., A. Yacob, J. Wen, G. Roerink, Y. He, B. Gao, H. Boogaard and C. van Diepen. 2003. Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory, experimental validation and application to drought monitoring over the North China Plain. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(1): 89-101.
31. Singh, B. and D. Singh. 1995. Agronomic and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. *Field Crops Research*, 42(2): 57-67.
32. Singh, R. and G. Senay. 2015. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. *Water*, 8(1): 9-24.
33. Tabari, H., M. Grismer and S. Trajkovic. 2013. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31(2): 107-117.
34. Tang, R. and Z. Li. 2017. An improved constant evaporative fraction method for estimating daily evapotranspiration from remotely sensed instantaneous observations. *Geophysical Research Letters*, 44(5): 2319-2326.
35. Tokar, A.S. and M. Markus. 2000. Precipitation-runoff modeling using artificial neural networks and conceptual models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2): 156-161.
36. van der Kwast, J., W. Timmermans, A. Gieske, Z. Su, A. Olioso, L. Jia, J. Elbers, D. Karssenber, and S. de Jong. 2009. Evaluation of the Surface Energy Balance System (SEBS) applied to ASTER imagery with flux-measurements at the SPARC 2004 site (Barrax, Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7): 1337-1347.
37. Wagle, P., N. Bhattarai, P. Gowda and V. Kakani. 2017. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128: 192-20.
38. Wildhaber, M.L., C.K. Winkle, E.H. Moran, C.J. Anderson, K.J. Franz and R. Dey. 2015. Hierarchical stochastic modelling of large river ecosystems and fish growth across spatio-temporal scales and climate models: the Missouri River endangered pallid sturgeon example. *Geological Society of London Special Publications*, 408: 119-145.