

مدلسازی پیوسته جریان رودخانه مارون با به کارگیری مدل مفهومی HEC-HMS

چکیده

پیش‌بینی جریان آبراهه به‌منظور بهره‌برداری موثر از مخازن کنترل سیل و سامانه‌های سیل بندهای خاکی و بتنی ضروری است. پیش‌بینی جریان در زمینه تصمیم‌گیری برای تامین آب، انرژی برق‌آبی، نیازهای زیست‌محیطی و دیگر نیازهای بهره‌برداری مفید هستند. از این رو پیش‌بینی جریان آبراهه در حوضه‌های آبریز از اهمیت زیادی برخوردار است. معمولاً پیش‌بینی‌ها بر مبنای شرایط هواشناسی و هیدرولوژیکی اخیر در حوضه هستند و ممکن است شرایط هواشناسی پیش‌بینی شده در آینده را شامل شوند. در این تحقیق به پیش‌بینی روزانه جریان آبراهه در حوضه مارون با مدل HEC-HMS پرداخته می‌شود، تا توانایی و دقت این مدل در پیش‌بینی جریان آبراهه ارزیابی گردد. به این منظور ابتدا شبیه‌سازی پیوسته بارش-رواناب به‌صورت روزانه قبل از زمان پیش‌بینی با استفاده از مدل تلفات شمارش رطوبت خاک (SMA: Soil Moisture Accounting) انجام شد. جهت واسنجی مدل HEC-HMS از داده‌های دبی روزانه از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ و صحت‌سنجی مدل از داده‌های از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ در ایستگاه هیدرومتری اینک استفاده شد. جریان آبراهه روزانه در ایستگاه ایدنک از تاریخ ۱۳۹۰/۸/۱۴ تا ۱۳۹۱/۸/۱۴ پیش‌بینی شد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های آماری ضریب ناش-ساتکلیف، ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا در مرحله پیش‌بینی جریان آبراهه در ایستگاه ایدنک به ترتیب برابر ۰/۵۶، ۰/۶۷، ۳۲/۲ مترمکعب در ثانیه است. بنابراین مدل HEC-HMS از دقت و توانایی خوبی در پیش‌بینی جریان روزانه آبراهه برخوردار می‌باشد.

واژگان کلیدی: پیش‌بینی جریان، مدل HEC-HMS، رودخانه مارون، مدلسازی پیوسته، SMA

علیرضا کیهانی^۱

حسین فتحیان^{۲*}

رامین رستمی^۳

۱. کارشناس سواحل، تالاب‌ها و آبهای مرزی، معاونت حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان.
۲. گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۳. گروه مهندسی عمران، واحد میاندوآب، دانشگاه آزاد اسلامی، میاندوآب، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات

Fathian.h@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷

این مقاله برگرفته از فعالیت پژوهشی سایر است.

مقدمه

پیش‌بینی رواناب به‌منظور بهره‌برداری موثر از مخازن کنترل سیل و سامانه‌های سیل بند خاکی ضروری است. پیش‌بینی‌ها همچنین ممکن است با برآورد زمان و محدوده خسارات مورد انتظار یا شرایط مخرب سیل، بهره‌برداری اضطراری را پشتیبانی نماید. پیش‌بینی‌ها بر مبنای شرایط هواشناسی و هیدرولوژیکی اخیر در حوضه هستند و ممکن است شرایط هواشناسی پیش‌بینی شده در آینده را شامل شوند. اگرچه اکثر کاربردها در زمینه پیش‌بینی سیل می‌باشد، پیش‌بینی رواناب ممکن است تامین آب، انرژی برق‌آبی، نیازهای زیست‌محیطی و دیگر نیازهای بهره‌برداری را پشتیبانی نماید. Singh (2015) شبیه‌سازی پیوسته جریان با استفاده از الگوریتم SMA در حوضه آبریز وامیس دیهار هند را انجام دادند. نتایج حاصل توانایی مدل HEC-HMS در دوره صحت‌سنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. Sintayehu (2015) با استفاده از مدل HEC-HMS شبیه‌سازی جریان بالادست حوضه رودخانه نیل انجام دادند و نتایج حاصل نشان داد که پارامترهای SMA و مدل مخزن خطی بیشترین تأثیر را در تولید هیدروگراف خروجی حوضه داشته، همچنین توانایی مدل در دوره صحت‌سنجی و اعتبارسنجی تأیید شده است. احمد پور و همکاران (۱۳۹۵) به مقایسه دقت پیش‌بینی رواناب ماهانه در حوضه مارون با استفاده از مدل HEC-HMS و مدل‌های سری زمانی پرداختند و در نهایت مدل HEC-HMS به عنوان مدل برتر جهت پیش‌بینی رواناب ماهانه حوضه مذکور را معرفی نمودند. خضریان نژاد و همکاران (۱۳۹۱) به پیش‌بینی رواناب با استفاده از پیش‌بینی کمی بارش حاصل از برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی عددی جو پرداختند. برای پیش‌بینی بارش از مدل WRF و برای پیش‌بینی رواناب از مدل HEC-HMS استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر رواناب پیش‌بینی‌شده کمتر از مقادیر مشاهده‌ای آن است. معصوم زاده

فتحیان (۱۳۹۵) با به کارگیری مدل HEC-HMS به همراه مدل تلفات محاسبه رطوبت خاک (SMA) به شبیه‌سازی جریان در حوضه آبریز دز از سال ۱۳۷۷ تا سال ۱۳۸۴ پرداختند. نتایج بیانگر آن است که مدل HEC-HMS به همراه مدل تلفات SMA از قابلیت خوبی در شبیه‌سازی پیوسته رواناب کل روزانه در دوره‌های خشک و تر متوالی در حوضه دز برخوردار می‌باشد. فتحیان و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS به همراه مدل تلفات محاسبه کننده رطوبت خاک (SMA) به شبیه‌سازی جریان ورودی به مخزن سد مارون پرداختند. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل به ترتیب از داده‌های روزانه دبی مربوط به سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۷۴ و ۱۳۸۵-۱۳۹۰ در ایستگاه هیدرومتری ایدنک استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که ضریب ناش-ساتکالیف و ضریب تعیین برای دوره صحت‌سنجی مدل به ترتیب برابر با ۰/۶۵ و ۰/۸ است که بیانگر دقت خوب مدل HEC-HMS به همراه مدل تلفات SMA در شبیه‌سازی پیوسته جریان روزانه در حوضه کارون می‌باشد. غفوری و همکاران (۱۳۹۲) مدل‌سازی پیوسته جریان روزانه در حوضه کارون به کمک مدل تلفات SMA انجام دادند. نتایج حاصل توانایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی پیوسته جریان در دوره صحت‌سنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. گومیندوگا و همکاران (۲۰۱۶) مدلسازی بارش-رواناب را در ۱۰ زیر حوضه آبریز مختلف دارای آمار و بدون آمار رواناب (فاقد ایستگاه) با نرم‌افزار HEC-HMS در زیمبابوه بررسی نمودند. همچنین سهم هر یک از زیر حوضه‌های فاقد آمار در تولید رواناب خروجی حوضه بررسی و محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل میزان رواناب و دبی پیک حوضه را در حوضه‌های دارای آمار به طور مناسبی پیش‌بینی می‌کند با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون می‌توان دریافت که در زمینه شبیه‌سازی تک‌واضعه و پیوسته بارش-رواناب در حوضه‌های آبریز، تأثیر توسعه شهری بر دبی اوج سیل و تعیین پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها در حوضه‌های مختلف مطالعاتی انجام شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده تاکنون، در زمینه پیش‌بینی بلند مدت جریان آبراهه در حوضه‌های آبریز با مدل HEC-HMS مطالعه‌ای تاکنون ملاحظه نشده است. بنابراین هدف از این مقاله ارزیابی دقت مدل مفهومی HEC-HMS در پیش‌بینی جریان روزانه آبراهه در حوضه مارون با مدلسازی پیوسته جریان است.

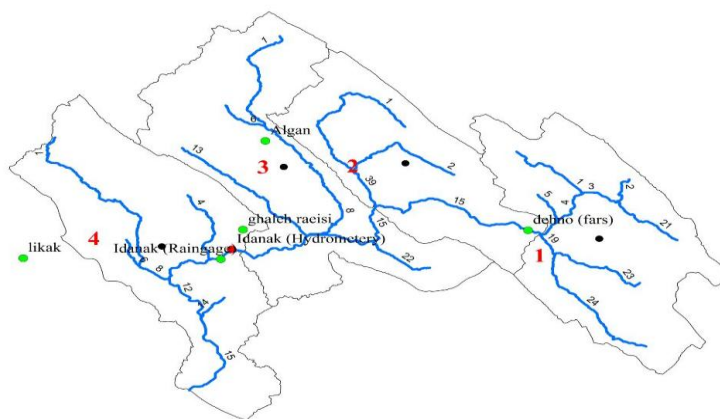
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

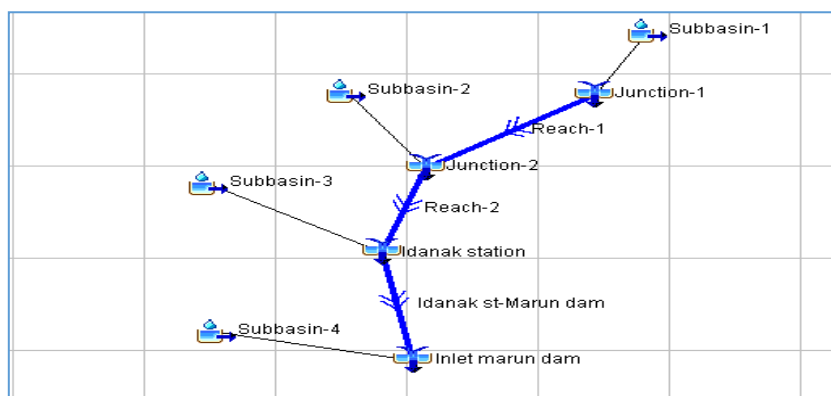
حوضه مارون با مساحت حدود ۳۸۲۴ کیلومترمربع در مختصات جغرافیای (۴۹°۵۰') تا (۵۱°۱۰') طول شرقی، (۳۰°۳۰') تا (۳۱°۲۰') عرض شمالی و در ارتفاعات شهرستان بهبهان در استان خوزستان واقع شده است. حوضه آبریز مارون توسط حوضه‌های آبریز رودخانه‌های زهره و کارون در استان خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد احاطه گردیده است. بخش عمده حوضه آبریز رودخانه مارون را مناطق کوهستانی تشکیل می‌دهد. از این میان بخش‌های شمالی و شرقی به ترتیب نسبت به بخش‌های دیگر ارتفاع بیشتری دارند. حوضه آبریز مارون تا محل سد مارون بر اساس توپوگرافی و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری با استفاده از نرم‌افزار ARCGIS به چهار قسمت تقسیم شده و هر یک به‌عنوان یک زیر حوضه به مدل حوضه معرفی شده است. شکل ۱ نقشه را همراه با شماره‌های مربوط به هر زیر حوضه و موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری را نشان می‌دهد. شکل (۲) شماتیک مدل هندسی حوضه مارون در محیط مدل HEC-HMS را نشان می‌دهد. جدول (۱) مشخصات هندسی زیر حوضه‌ها را نشان می‌دهد.

روش کار

داده‌های بارندگی روزانه شامل ۴ ایستگاه از آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی متعلق به وزارت نیرو از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ تهیه شده است. مقادیر دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری ایدنک متعلق به وزارت نیرو جهت کالیبراسیون مدل استفاده شده است.



شکل ۱: زیرحوضه بندی حوضه مارون و موقعیت ایستگاه هیدرومتری، تبخیرسنجی و باران سنجی



شکل ۲: شماتیک مدل هندسی حوضه مارون در محیط مدل HEC-HMS

جدول ۱: مشخصات هندسی زیرحوضه های حوضه مارون

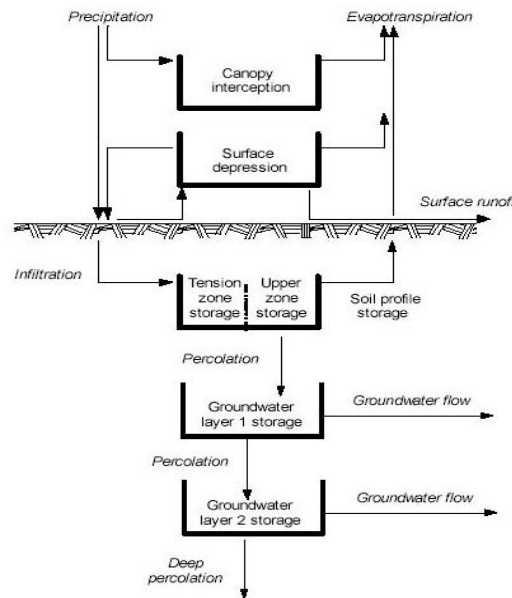
زیر حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	محیط (کیلومتر)	ضریب گراولپوس	حداقل ارتفاع (متر)	حداکثر ارتفاع (متر)	ارتفاع متوسط (متر)	شیب متوسط حوضه (درصد)	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)
۱	۹۱۷/۵	۱۷۳	۰/۰۷۲	۱۳۳۹	۳۴۹۱	۲۴۱۵	۷/۱	۳۲
۲	۶۸۶/۶	۷۴	۰/۰۳۵	۸۵۹	۳۳۲۱	۲۰۷۹	۹/۴	۴۲
۳	۱۰۶۷	۸۸	۰/۰۴۷	۵۶۷	۳۱۶۵	۱۸۶۴	۷/۹	۷۱
۴	۱۰۲۰	۹۵	۰/۰۵۴	۳۶۲	۳۱۱۷	۱۷۴۷	۸/۶	۷۳

مدل HEC-HMS یک مدل مفهومی نیمه توزیعی بوده که دارای قابلیت شبیه سازی تلفات و نفوذ، ذوب برف، روند یابی زیر حوضه ها و روندیابی شبکه رودخانه ها می باشد. در نسخه جدید این مدل، قابلیت پیش بینی جریان (forecasting streamflow) اضافه شده است. پیش بینی رواناب معمولاً شامل شبیه سازی شرایط گذشته و آینده است. پیش بینی با انتخاب زمان پیش بینی شروع می شود. معمولاً زمان پیش بینی آخرین زمان موجود برای مشاهدات هواشناسی بارش، دمای هوا و بقیه متغیرها است. اگر مشاهدات رواناب، اشل و رقوم سطح آب در مخزن موجود باشد، آخرین مقدار موجود عموماً نزدیک به زمان پیش بینی است. شبیه سازی به صورت ساعتی یا روزانه قبل از زمان پیش بینی شروع می شود. نتایج محاسبه شده بین زمان شروع و زمان پیش بینی به عنوان دوره قبل از پیش بینی نامیده می شود. هنگامی که مشاهدات شرایط فعلی حوضه موجود باشد، با نتایج محاسبه شده در دوره قبل از پیش بینی مقایسه می شوند تا اصلاحات کالیبراسیون انجام شده و عملکرد

مدل را بهبود ببخشد. معمولاً مشاهدات هواشناسی بعد از زمان پیش‌بینی موجود نیستند و پیش‌بینی مقادیر آینده استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال پیش‌بینی کمی بارش، پیش‌بینی هواشناسی مقدار بارش آینده را تهیه می‌کند. پیش‌بینی‌های مشابه برای بقیه متغیرهای هواشناسی مانند دما نیز استفاده می‌شود. رواناب آینده بر مبنای شرایط هواشناسی پیش‌بینی شده شبیه‌سازی می‌شود. این دوره از زمان در آینده، دوره پیش‌بینی نامیده می‌شود. زیر حوضه‌ها و آبراهه‌ها در یک جایگزین پیش‌بینی با مقادیر پیش‌فرض با استفاده از مقادیر پارامترهای مدل حوضه مقداردهی می‌شوند. مقادیر پارامترها در المان‌ها ممکن است برای پیش‌بینی بدون تغییر در مقادیر پارامترهای اصلی در مدل حوضه اصلاح شوند. این برای اصلاح پارامترها لازم نیست. با این وجود اکثر پیش‌بینی‌ها نیاز به اصلاح پارامترها جهت اعمال شرایط فعلی حوضه بعلاوه شرایط فعلی هواشناسی را شامل می‌شوند. به‌منظور شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب، برای مدل تلفات شمارش رطوبت خاک (SMA) استفاده شد.

مدل SMA تنها مدل پیوسته در این نرم‌افزار بوده و علاوه بر جدید بودن آن، توانایی مدل‌سازی سیستم‌های هیدرولوژیکی را برای دوره‌های طولانی‌مدت به‌صورت پیوسته دارا است. (HEC, 2000). این مدل با استفاده از یک سری لایه‌های ذخیره‌کننده، حوضه آبریز را معرفی می‌نماید. هنگامی که بارش صورت می‌گیرد اولین لایه‌ای که ظرفیت آن پر می‌گردد ذخیره برگانی است. دومین لایه ذخیره‌ای، ذخیره چلابی است و سپس نفوذ سطحی رخ می‌دهد لذا سومین لایه ذخیره، ذخیره پروفیل خاک است.

آب مازاد بر ذخایر مذکور به‌صورت رواناب سطحی ظاهر می‌شود. پروفیل خاک بر اثر تبخیر و تعرق، بخشی از آب خود را از دست می‌دهد و بخشی از آب آن توسط نفوذ عمقی به لایه‌های آب زیرزمینی می‌رسد و ذخایر آب زیرزمینی به مدل مخزن خطی جهت مدل‌سازی جریان پایه رودخانه مرتبط می‌گردد. شکل ۳ طرح شماتیک و مفهومی الگوریتم محاسبه رطوبت خاک را نشان می‌دهد. همچنین از بین مدل‌های مختلف تبدیل بارش به رواناب، مدل هیدروگراف واحد کلارک به دلیل استفاده عمومی‌تر در حوضه‌های بزرگ و عملکرد قابل قبول آن استفاده گردید. همچنین بنابر توصیه‌های صورت گرفته به همراه مدل SMA از مدل جریان پایه مخزن خطی برای برآورد جریان پایه بهره گرفته شد. برای روندیابی هیدروگراف در طی بازه‌ها رودخانه نیز روش روندیابی ماسکینگام انتخاب شد. علاوه بر این با توجه به برف‌گیر بودن حوضه برای مدل‌سازی ذوب برف از روش شاخص دما بهره گرفته شده است.



شکل ۳: طرح شماتیک و مفهومی الگوریتم محاسبه رطوبت خاک (HEC, 2000)

به‌منظور واسنجی مدل HEC-HMS از داده‌های دبی روزانه از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ و صحت‌سنجی مدل از داده‌های از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ در ایستگاه هیدرومتری ایدنک استفاده شد. رواناب روزانه در ایستگاه ایدنک از تاریخ ۱۳۹۰/۸/۱۴ تا ۱۳۹۱/۸/۱۴ پیش‌بینی شده است.

پارامترهای کالیبراسیون برای هر زیر حوضه شامل ۱۴ پارامتر مربوط به مدل تلفات SMA، ۶ پارامتر مربوط به مدل مخزن خطی و ۲ پارامتر مربوط به مدل تبدیل بارش به رواناب کلارک است. پارامترهای کالیبراسیون برای هر آبراهه شامل ۲ پارامتر مربوط به ضرایب X و K ماسکینگام می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد زیر حوضه‌ها و آبراهه‌های حوضه مارون به ترتیب برابر با ۴ و ۳ است، تعداد کل پارامترها جهت کالیبراسیون مدل HEC-HMS برابر با ۹۴ به دست می‌آید. بنابراین با توجه به تعداد زیاد پارامتر، کالیبراسیون مدل زمان‌بر است. مدل مخزن خطی که برای تهیه جریان پایه مورد استفاده قرار می‌گرفت با مدل SMA رابطه مستقیم داشته و ضرایب آب‌های زیرزمینی برای هر دو مدل به یکدیگر وابسته هستند. عملیات کالیبراسیون مدل می‌تواند به صورت دستی و با استفاده از قضاوت مهندسی به روش سعی و خطا و یا به صورت خودکار توسط مدل انجام گیرد. در حوضه مارون عمل کالیبراسیون مدل فقط در ایستگاه هیدرومتری اینک به صورت دستی با تصحیح مکرر پارامترها در هر بار اجرای مدل صورت گرفته است. برای مقایسه هیدروگراف مشاهداتی با هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مراحل کالیبراسیون، صحت‌سنجی و پیش‌بینی مدل، شاخص‌های نیکوئی برازش مختلفی را می‌توان استفاده نمود. این شاخص‌ها به دو گروه معیارهای گرافیکی و پارامترهای آماری سنجش خطا قابل تقسیم هستند. از دسته معیارهای گرافیکی می‌توان به ترسیم هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در کنار هم اشاره نمود. از شاخص‌های آماری سنجش خطا می‌توان به ضریب تعیین (R^2)، ضریب ناش-ساتکلایف (NS: Nash-Sutcliffe)، درصد خطای حجمی کل (PTEV: Percent of Total Volume Error) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE: Root Mean Square Error) اشاره کرد که به ترتیب در روابط ۱ تا ۴ آمده است. ضریب ناش-ساتکلایف بیانگر راندمان مدل بوده که اخیراً در مسائل هیدرولوژی به‌وفور مورد استفاده قرار گرفته است. ضریب ناش-ساتکلایف می‌تواند مقداری از منفی بی‌نهایت تا یک را به خود اختصاص دهند که عدد یک نشان‌دهنده برازش کامل و انطباق ۱۰۰٪ بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. در روابط ۱ تا ۴، n برابر با تعداد داده‌های جریان، O_i و S_i داده‌های جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در گام زمانی t ام، \bar{O} دبی میانگین مشاهده‌ای و Cov کوواریانس داده‌ها است.

$$R^2 = (Cov(O_i, S_i) / \sqrt{Cov(O_i, O_i) \cdot Cov(S_i, S_i)})^2 \quad (1)$$

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_i^n (O_i - S_i)^2}{\sum_i^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (2)$$

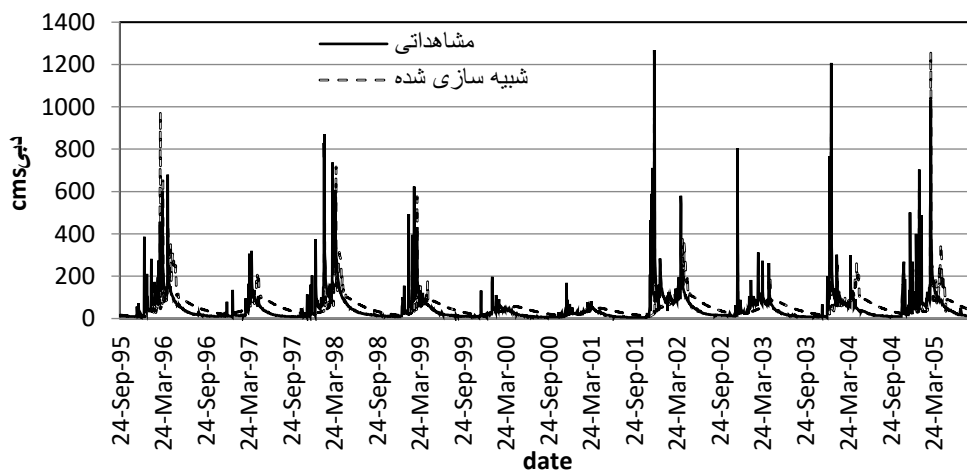
$$PTEV = \frac{\sum_i^n O_i - \sum_i^n S_i}{\sum_i^n O_i} * 100 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (4)$$

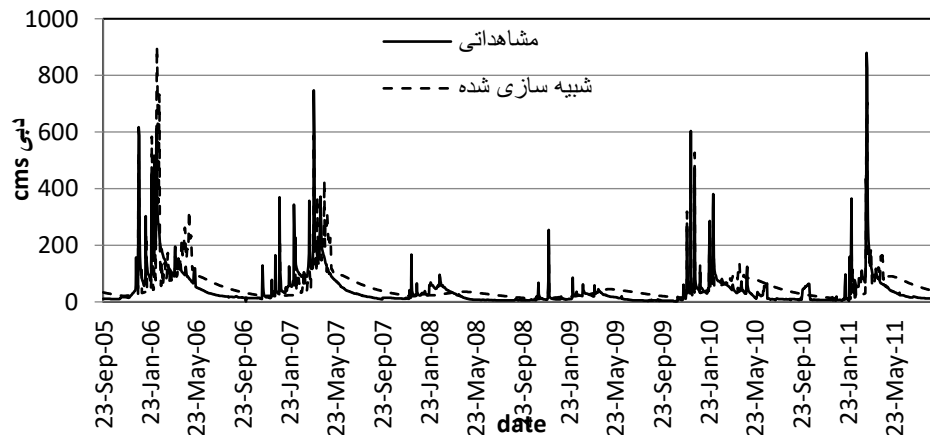
نتایج

پس از هر اجرای مدل، به منظور ارزیابی عملکرد مدل و بررسی چگونگی کالیبراسیون مدل، هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS با هیدروگراف جریان مشاهداتی مقایسه گردید. همچنین شاخص‌های آماری سنجش خطای مدل محاسبه و با مقادیر شاخص‌های آماری در اجرای قبل مقایسه شد. چنانچه دقت مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب مناسب تشخیص داده نمی‌شد، عملیات شبیه‌سازی دوباره تا حصول نتایج رضایت‌بخش از سر گرفته می‌شد. شکل‌های (۴ الی ۵) مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۴ و ۵) می‌توان دریافت که مدل HEC-HMS در برآورد دبی جریان با مقادیر کم و پایه نسبت به دبی‌های اوج از دقت خوبی برخوردار است. علت آن این است که اولاً داده‌های موجود به صورت پیوسته و مستمر در هر روز شامل بارش، دبی جریان، دمای هوا و تبخیر و تعرق جهت شبیه‌سازی پیوسته فرآیند بارش-رواناب در طول حداقل یک سال آبی به صورت روزانه است. در حالی که پارامترهای زمانی برآورد شده در زیر حوضه‌ها شامل زمان تمرکز، زمان تأخیر و ضریب ذخیره کلارک به صورت ساعتی است. ثانیاً هیدروگراف جریان در ایستگاه هیدرومتری در طول یک سال آبی در اکثر روزهای سال به صورت جریان پایه با مقادیر دبی کم و با تعداد کم مقادیر جریان سیلابی با دبی اوج شدید است. با توجه به جدول ۶ مقدار ضریب ناش-ساتکلایف و ریشه میانگین مربعات خطا بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی مدل به ترتیب برابر با

۰/۷۲ و ۵۵/۲ متر مکعب در ثانیه است که بیانگر دقت و راندمان خوب مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد. با توجه به جدول ۶ مقدار درصد خطای حجمی کل بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی مدل برابر با ۲۳/۱- درصد بوده که بیانگر کم برآورد بودن مدل در برآورد حجم کل رواناب ولی با دقت نسبتاً قابل قبول است. با توجه به جدول (۶) مقدار ضریب ناش-ساتکلایف، ریشه میانگین مربعات خطا بین هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی مدل به ترتیب برابر با ۰/۶۹ و ۴۸/۵ مترمکعب در ثانیه بوده که نشان‌دهنده کالیبراسیون مناسب مدل و قابل قبول بودن دقت مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه مارون است. ضمناً با توجه به جدول (۶)، درصد خطای حجمی کل بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی مدل برابر با ۲۱/۶- درصد بوده که می‌توان دریافت مشابه مرحله واسنجی، مدل حجم کل رواناب را نسبتاً کم برآورد کرده است. شکل (۶) مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و پیش‌بینی شده از تاریخ ۱۳۹۰/۸/۱۴ تا ۱۳۹۱/۸/۱۴ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) می‌توان دریافت که تغییرات مقادیر هیدروگراف رواناب پیش‌بینی شده نسبت به هیدروگراف مشاهداتی نسبتاً مناسب است. همچنین با توجه به جدول (۶) مقدار ضریب ناش-ساتکلایف و ریشه میانگین مربعات خطا بین هیدروگراف مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده به ترتیب برابر با ۰/۵۶ و ۳۲/۲ مترمکعب در ثانیه بوده که بیانگر دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی روزانه رواناب در حوضه مارون است. ضمناً با توجه به درصد خطای حجمی کل بین هیدروگراف مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده برابر با ۱۸/۳- درصد در دوره پیش‌بینی، می‌توان دریافت که مقادیر رواناب پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر مشاهداتی متناظر با آن است. خضریان نژاد و همکاران (۱۳۹۱) در پیش‌بینی رواناب با مدل HEC-HMS با استفاده از بارش پیش‌بینی شده با مدل WRF، نشان دادند که مقادیر رواناب پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر مشاهداتی است که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارد.



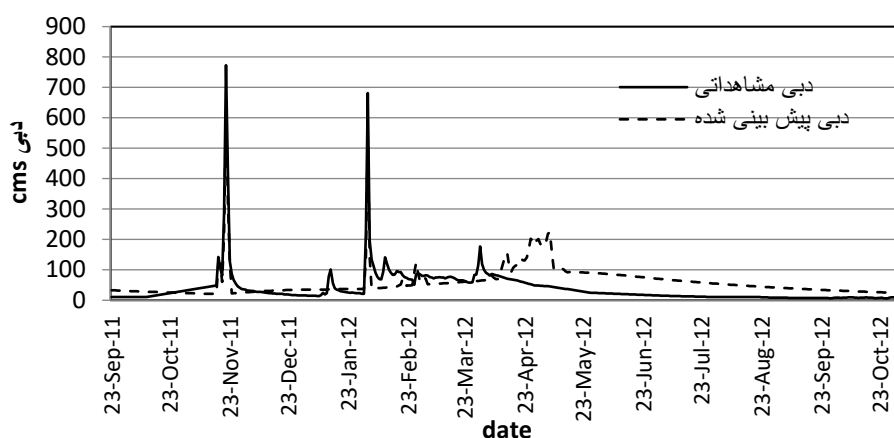
شکل ۴: مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS در مرحله واسنجی مدل



شکل ۵: مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS در مرحله صحت‌سنجی مدل

جدول ۶: معیارهای آماری نیکوئی برازش برای دوره کالیبراسیون، صحت سنجی و پیش‌بینی

معیارهای آماری	واسنجی	صحت سنجی	پیش‌بینی
R2	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۶۷
NS	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۵۶
PTVE (%)	-۲۳/۱	-۲۱/۶	-۱۸/۳
RMSE (cms)	۵۵/۲	۴۸/۵	۳۲/۲



شکل ۶: مقایسه هیدروگراف رواناب مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده با مدل HEC-HMS

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به محدودیت منابع آب شیرین قابل استحصال، پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر رواناب حوضه‌ها از ارکان اساسی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب سطحی است. لذا در این مقاله جهت پیش‌بینی رواناب در حوضه مارون از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS به همراه الگوریتم محاسبه‌کننده پیوسته رطوبت خاک بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از پیش‌بینی پیوسته بارش-رواناب در حوضه مارون نشان می‌دهد که مدل تلفات شمارش رطوبت خاک (SMA)، قابلیت و دقت قابل قبول جهت شبیه‌سازی پیوسته فرایند بارش-رواناب در حوضه‌های آبریز را دارد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات مقادیر هیدروگراف رواناب پیش‌بینی شده با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، نسبت مناسب است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقدار ضریب ناش-سانتکلایف و ریشه میانگین مربعات خطا بین هیدروگراف مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده در مرحله پیش‌بینی به ترتیب برابر با ۰/۵۶ و ۳۲/۲ مترمکعب در ثانیه بوده که بیانگر دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی رواناب در حوضه کارون است. ضمناً با توجه به درصد خطای حجمی کل بین هیدروگراف مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده برابر با ۱۸/۳- درصد در دوره پیش‌بینی، می‌توان دریافت که مقادیر رواناب پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر مشاهده‌ای متناظر با آن است.

سیاسگزاری

بدین‌وسیله از معاونت مطالعات پایه سازمان آب و برق خوزستان به دلیل در اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات و نقشه‌های پایه و دفتر پژوهش‌های کاربردی آن سازمان، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- احمد پور، ع.، حقیقت‌جو، پ. و فتحیان، ح. ۱۳۹۵. پیش‌بینی جریان درحوضه مارون با مدل HEC-HMS و مقایسه آن با مدل‌های سری زمانی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.
- خضریان‌نژاد، ن.، حجام، س.، میرزایی، ا. و مشکواتی، ا. ح. ۱۳۹۱. پیش‌بینی رواناب حوضه آبریز تیره با استفاده از پیش‌بینی کمی بارش خروجی مدل WRF، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره ۱۲.

غفوری، م.، تقیان، ب.، طاهری شهراینی، ح. و باقری شورکی، س. ۱۳۹۱. مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه کارون به کمک مدل تابع تلفات SMA، مجله تحقیقات منابع آب، شماره ۹.

فتحیان، ح.، احمد پور، ع. و قرشی‌زاده، ف. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی پیوسته جریان روزانه ورودی به مخزن سد مارون با استفاده از مدل تلفات SMA، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی، دانشگاه شهرکرد.

معصوم زاده، س. و فتحیان، ح. ۱۳۹۵. تفکیک جریان پایه از رواناب کل در حوضه دز با استفاده از مدل HEC-HMS. سومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Gumindoga, W., Rwasoka, D.T., Nhapi, I. and Dube, T. 2016. Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model. *Physics and Chemistry of the Earth*. doi: 10.1016/j.pce.2016.05.002.

Hydrologic Engineering Center (HEC). 2000. Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif.

Singh, W.R. and Jain, M.K. 2015. Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*. 4(4), pp: 398-408.

Sintayehu, L.G. 2015. Application of the HEC-HMS Model for Runoff Simulation of Upper Blue Nile River Basin. *Hydrology: Current Research*, 6(2), pp:1-8.

Continuous river flow modeling using the conceptual HEC-HMS model

Alireza Keihani¹
Hossein Fathian^{*2}
Ramin Rostami³

1. Expert in Coasts, Wetlands, and Transboundary Waters, Deputy for Water Resources Protection and Utilization, Khuzestan Water and Power Authority.

2. Department of Water Resources Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

3. Department of civil Engineering, Miy.C., Islamic Azad University, Miyandoab, Iran.

*Corresponding author:
Fathian.h@iau.ac.ir

Received date: **December/03/2025**
Accepted date: **January/17/2026**

Abstract

Prediction of streamflow is essential for the effective operation of flood control reservoirs and earthen and concrete levee systems. Therefore, forecasting streamflow in watersheds is of great importance. In this study, daily streamflow prediction in the Marun watershed was carried out using the HEC-HMS model, in order to evaluate the capability and accuracy of this model in streamflow forecasting. For this purpose, continuous rainfall-runoff simulation on a daily basis prior to the prediction period was performed using the Soil Moisture Accounting (SMA) loss model. Calibration of the HEC-HMS model was conducted using daily discharge data from 2001 to 2006, and model validation was performed with data from 2007 to 2011 at the Idenak hydrometric station. Daily streamflow at the Idenak station was predicted for the period from November 5, 2011 to November 5, 2012. The results show that the statistical indices Nash-Sutcliffe efficiency, coefficient of determination, and root mean square error during the prediction stage at the Idenak station were 0.56, 0.67, and 32.2 cubic meters per second, respectively. Therefore, the HEC-HMS model demonstrates good accuracy and capability in predicting daily streamflow.

Keywords: Streamflow forecasting, HEC-HMS model, Marun River, Continuous modelling, SMA.