

تخمین رواناب روزانه به کمک مدل نیمه مفهومی IHACRES در حوضه آبریز ناورود گیلان

مرتضی لطفی راد^۱، آرش ادیب^{۲*}، علی حقیقی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- منابع آب، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۲۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۳/۳۰)

چکیده

تصمیم‌گیری در مورد مدیریت منابع آب و ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های هیدرولیکی، مستلزم داشتن اطلاعات مطمئن درباره میزان دبی جریان در حوضه آبریز است تا با توجه به دبی سیلاب طراحی بتوان تصمیم‌گیری کرد. بنابراین، بهره‌گیری از مدل‌های شبیه‌سازی فرایند بارش- روانابی که علاوه بر دقت خوب، به اطلاعات ورودی کمی نیز نیاز دارند، با اهمیت است. مدل IHACRES از مدل‌های نیمه مفهومی بارش- رواناب است که قادر است با دریافت اطلاعات کم، ابتدا به تولید بارش مؤثر و سپس به شبیه‌سازی رواناب بپردازد. در پژوهش حاضر بارش- رواناب حوضه ناورود گیلان به کمک مدل IHACRES با استفاده از داده‌های دبی روزانه ایستگاه خرجگیل در خروجی حوضه و نیز داده‌های بارش و دمای روزانه ایستگاه خلیان در مرکز ثقل حوضه طی دوره ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ به‌عنوان دوره کالیبراسیون و دوره ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ نیز به‌عنوان دوره صحت‌سنجی شبیه‌سازی شد. نتایج بر اساس ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف (E) و میانگین خطای کل (BIAS) و میانگین خطای نسبی پارامتریک (ARPE) ارائه شد که مقدار به‌دست آمده E در دوره کالیبراسیون و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۴۶ به دست آمد که با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین قابل قبول است.

کلیدواژه‌گان: بارش، رواناب، حوضه آبریز ناورود، ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف، مدل IHACRES.

مقدمه

تصمیم‌گیری در مسائل مربوط به مدیریت منابع آب، طراحی سازه‌های هیدرولیکی و طرح‌های کنترل سیلاب اهمیت ویژه‌ای دارد. بنابراین، تخمین قابل قبول از رواناب حاصل از بارندگی نیز مورد توجه است و نتایج به دست آمده از مدل‌های بارش-رواناب، که به دو بخش توزیعی و یکپارچه تقسیم می‌شوند، نیز نقش بسزایی در این تصمیم‌گیری‌ها دارند. از طرفی، به علت محدودیت‌هایی مانند نبود آمار مورد نیاز، به دلیل نداشتن ایستگاه‌های اندازه‌گیری و یا مقرون به صرفه نبودن جمع‌آوری برخی داده‌ها، از مدل‌هایی که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه هستند و نیاز به اطلاعات کمتر، ولی در عوض دقت مدل‌سازیشان قابل قبول باشد، به کار برده می‌شوند. یکی از این مدل‌ها IHACRES است که به مراتب در بسیاری از حوضه‌های آبریز استفاده شده و نتایج قابل قبولی نیز ارائه کرده است.

گودرزی و همکارانش کارایی سه مدل بارش رواناب IHACRES، SWAT و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو را ارزیابی و مقایسه کردند. از جمله معیارهای ارزیابی در این مطالعه، ضریب کارایی مدل‌نش-ساتکلیف و ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE) هستند. دوره‌های مشترک شبیه‌سازی این سه مدل از یک بازه ۳۰ ساله انتخاب شدند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد SWAT با ضریب کارایی مدل‌نش-ساتکلیف^۲ ۰/۸ و ریشه میانگین مربعات خطای ۱/۲ میلی‌متر در سال و SIMHYD با ضریب کارایی مدل‌نش-ساتکلیف ۰/۶۸ و ریشه میانگین مربعات خطای ۵/۱ میلی‌متر در سال، به ترتیب بیشترین و کمترین کارایی را در دوره کالیبراسیون دارند. این مقادیر برای دوره صحت‌سنجی ۰/۷۳ و ۱/۱ میلی‌متر در سال برای SWAT و ۰/۴ و ۲ میلی‌متر در سال برای SIMHYD هستند. نتایج نشان داد مدل SWAT بهترین عملکرد را از شبیه‌سازی رواناب حوضه نسبت به داده‌های مشاهداتی در دوره صحت‌یابی داشته است [۱]. آشفته و مساح بوانی ابتدا داده‌های بارش و دمای مربوط به حوضه آیدوغموش را در دوره دور پیش‌بینی اقلیمی کردند و سپس به منظور برآورد رژیم حداکثر دبی سالانه (شدت و فراوانی) به کمک مدل IHACRES رواناب حاصل از داده‌های آبی را مدل‌سازی کردند؛ که در دوره بازگشت‌های زیاد شدت دبی حداکثر افزایش، ولی احتمال وقوع آن کاهش می‌یابد

[۲]. حسینی و همکارانش با در نظر گرفتن ساختارهای مختلف به کارگیری پارامترهای دبی، بارش و دما از ایستگاه‌های موجود حوضه صوفی‌چای، به مدل‌سازی فرایند بارش-رواناب در مدل IHACRES و شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب ژنتیک در شرایطی که تغییر اقلیم با سناریوهای مختلفی اقلیمی و غیر اقلیمی لحاظ شود، پرداختند. همچنین، عدم قطعیت انتخاب سناریوهای انتشار مختلف برای دوره نزدیک، کم و برای اواسط قرن، بیشتر است [۳].

صادقی و همکارانش کارایی مدل IHACRES در شبیه‌سازی روزانه رواناب حوضه ناورود با استفاده از ضریب کارایی مدل‌نش-ساتکلیف و میانگین خطای کل را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میزان ضریب کارایی مدل‌نش-ساتکلیف و میانگین خطای کل در دوره کالیبراسیون به ترتیب ۰/۵۷ و ۸/۵۳ میلی‌متر در سال و در مرحله آزمون ۰/۴۸ و ۱۴/۹ میلی‌متر در سال است. بنا بر نتایج به دست آمده، مدل استفاده شده نشان داد دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی جریان حوضه ناورود دارد [۴]. درخور یادآوری است که این ضریب توسط نش و ساتکلیف در سال ۱۹۷۰ ابداع شده است [۵].

امیری و رودباری موسوی میزان قابلیت کارایی مدل هیدرولوژی IHACRES در شبیه‌سازی دبی روزانه رودخانه‌های پلرود و سلمان‌رود در استان گیلان را، که در منطقه مرطوب واقع است، بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان دهنده انحرافات کم مدل در شبیه‌سازی مقادیر روزانه دبی است. با در نظر گرفتن نتایج می‌توان بیان کرد که این مدل در شبیه‌سازی جریان در مناطق مرطوب مناسب است [۶]. یعقوبی و مساح بوانی عملکرد سه مدل مفهومی و پیوسته HBV، HEC-HMS و IHACRES در شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه نیمه‌خشک اعظم هرات را ارزیابی کردند. در تعیین عملکرد مدل‌ها از معیارهای عملکرد شامل ضریب کارایی مدل‌نش-ساتکلیف، میانگین خطای کل و ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شد. در نهایت، مشخص شد مدل HBV بهترین عملکرد در شبیه‌سازی رواناب پیوسته حوضه را دارد [۷].

دای و کروک نیز در پژوهش خود در دو حوضه لامبرشتسبوس^۳ و گروت-نیل ریور^۴ در آفریقای جنوبی به

3. Lambrechtsbos
4. Groot-Nylrivier

1. Root Mean Square Error
2. Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient

لیتلود و نیز لیتلود و همکارانش با اجرای یک مدل ساده در برابر مدلی پیچیده در دو حوضه با شرایط متفاوت در ولز و برزیل برای شبیه سازی بارش رواناب در مقیاس روزانه، نشان دادند مدل ساده، که مبتنی بر هیدروگراف واحد است، برای کالیبره شدن نیاز به اطلاعات کمتر مانند دبی، بارش و دمای هوا دارد، ولی مدل پیچیده علاوه بر این اطلاعات، نیاز به تصاویر ماهواره ای، نقشه های رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی و خاک دارد. این در حالی است که نتیجه مدل سازی هر دو مدل مشابه اند [۱۳ و ۱۴]. کارکانو و همکارانش با مقایسه مدل مفهومی IHACRES با دو مدل شبکه عصبی مصنوعی بازسازی شده مدل شبکه عصبی چندلایه پرسپترون^۱ (MLP) و شبکه عصبی بازگشتی جردن^۲ (JNN) و با تأکید بر بازسازی دوره های خشکسالی که برای مدیریت منابع آب ضروری است، دو حوضه کوچک با رژیم نامنظم و سیلابی را مدل سازی کردند. آنها با ترکیب JNN و تکنیک اثر حافظه به نتایج درخور توجهی در شبیه سازی رواناب از داده های بارش و دبی گذشته به کمک شبکه عصبی رسیدند و بیان کردند که در شرایطی که اطلاعات ورودی مناسب در دست نیست، روش های متریک بهتر از مفهومی عمل می کنند [۱۵]. کروک و جکمن با تغییر مدول غیرخطی به کاررفته در مدل IHACRES که مختص محاسبه بارش مؤثر است، درصدد تخمین رواناب در حوضه های فاقد آمار و زمانی که به اطلاعات تبخیر تفرق واقعی نیاز است، برآمدند. این نسخه جدید نیاز به سه پارامتر (بارش، دما و تبخیر تفرق) دارد که همبستگی آنها به یکدیگر کمتر از نسخه قبلی است [۱۶]. چاپمن اثر جریان بازگشتی در مدل سازی فرایند بارش - رواناب در مدل های توصیفی، که به تغذیه آب زیرزمینی منجر می شود، را بررسی کرد. از طرفی، مقدار این تغذیه خود وابسته به جریان سطحی است. تحقیق او روی ۲۲ حوضه معرف در استرالیا صورت گرفت و به این نتیجه رسید که معادله به کاررفته در مدل IHACRES برای جریان بازگشتی که شامل دو تابع نمایی است، برازش خوبی بر داده ها دارد [۱۷]. جاوید و آپروا به کمک مدل IHACRES رواناب شش حوضه فاقد آمار در هندوستان را مدل سازی کردند و برای صحت سنجی نیز مدل سازی جریان روزانه روی یک حوضه دارای آمار، که شرایط هیدرولوژیکی مشابه شش حوضه را

پیش بینی جریان به کمک مدل IHACRES پرداختند. در حوضه لامبرشتسبوس در دو دوره قبل و بعد از جنگل کاری ضرایب کارایی مدل نش - ساتکلیف آنها به ترتیب بیش از ۰/۸۱ و ۰/۸۱ به دست آمد؛ و مقدار اختلاف دبی شبیه سازی و مشاهداتی (میانگین خطای کل) به ترتیب ۲۵/۸ و ۸/۴ میلی متر در سال به دست آمد که دقت مدل را نشان می داد [۸]. خیرفام و همکارانش با شبیه سازی متوسط دبی روزانه جریان با استفاده از مدل IHACRES و ارزیابی کارایی آن در هفت زیرحوضه رودخانه گرگان رود استان گلستان به این نتیجه رسیدند که معیارهای کارایی نشان دهنده توانایی مدل در برآورد مقادیر زیاد دبی روزانه بود، ولی در بیشتر حوضه ها نتایج برآورد مقادیر دبی با فراوانی ۶۰ درصد ضعیف بود. در مجموع، نتایج مدل در تعدادی از زیرحوضه های مطالعه شده با ضریب کارایی مدل نش - ساتکلیف و کارایی حداکثر ۰/۶۷ و ۰/۷ نسبتاً قابل قبول ارزیابی شد [۹]. دوستی و همکارانش با شبیه سازی بارش - رواناب حوضه تمر با IHACRES به ضریب کارایی مدل نش - ساتکلیف ۰/۶۶ و میانگین خطای کل ۳/۴۱۲ میلی متر در سال طی دوره کالیبراسیون، و ضریب کارایی مدل نش - ساتکلیف ۰/۶۱ و میانگین خطای کل ۰/۴۱۶ میلی متر در سال در دوره صحت سنجی رسیدند که عملکرد رضایت بخش مدل در حوضه را بیان می کند [۱۰].

یه و همکارانش رواناب را در حوضه های کم آبدیده استرالیا، که رودخانه های آنها به صورت فصلی جریان داشتند و تخمین آینده آنها دشوارتر از حوضه های مرطوب بود، بررسی کردند. آنها از سه مدل بارش رواناب شامل GSF، IHACRES و LASCAM (مدل پیچیده تر) در سه حوضه با آینده کم فصلی به صورت روزانه و ماهانه استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل ساده GSF برای شبیه سازی داده های ماهانه مناسب تر است؛ و مدل IHACRES برای مدل سازی روزانه حوضه های خشک و همچنین حوضه های با آینده کم نیز مناسب است [۱۱]. هانسن و همکارانش عوامل مؤثر بر کیفیت تخمین رواناب شبیه سازی شده با مدل IHACRES را به کمک اطلاعات بارش و تبخیر روزانه یک دوره ۱۰۰ ساله در هشت حوضه بزرگ در استرالیا بررسی کردند [۱۲].

1. Multilayer perceptron neural network
2. Jordan recurrent neural network

ارزیابی (BIAS, E, ARPE) را تأمین می‌کنند، انتخاب می‌شود. مقادیر بهینه پارامترهای مدول غیرخطی نیز در مدل‌سازی به دست آمد. سپس، دوره صحت‌سنجی انتخاب و معیارهای آماری را برای این دوره نیز محاسبه شد و نتایج این بررسی در جدول‌ها و شکل‌ها ارائه شد.

پژوهش حاضر و تحقیق انجام‌شده توسط صادقی و همکارانش [۴] روی حوضه آبریز ناورود انجام شده‌اند و معیارهای ارزیابی مانند نش - ساتکلیف این دو تحقیق نزدیک به هم هستند، ولی تفاوت تحقیق حاضر با پژوهش صادقی و همکارانش، استفاده از آزمون همگنی روی داده‌های دما، بارش و دبی قبل از مدل‌سازی بارش - رواناب است تا دوره زمانی انتخاب‌شده بدون شکست باشد. از این‌رو، از آزمون نقطه شکست پیت^۲ استفاده شد. همچنین، در این تحقیق انتهای دوره زمانی استفاده‌شده، سال آبی ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴ است که نسبت به پژوهش صادقی و همکارانش از آمار به‌روزتری بهره گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

حوضه معرف ناورود، حوضه‌ای جنگلی - کوهستانی با مساحت ۲۷۴ کیلومترمربع و محیط ۷۸ کیلومتر واقع در کوه‌های تالش و بین طول‌های جغرافیایی ۳۵ تا ۴۸ و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ تا ۴۵ در شمالی در شهرستان تالش استان گیلان واقع است. بیشترین ارتفاع حوضه ۲۸۰۰ متر، ارتفاع متوسط حوضه ۱۳۹۴ متر و کمترین ارتفاع حوضه ۱۳۰ متر است. طول آبراهه اصلی ۲۷ کیلومتر، شیب متوسط حوضه ۱۳ درصد و زمان تمرکز حوضه ۵/۳۲ ساعت است. متوسط بارندگی حوضه ۸۵۳ میلی‌متر، متوسط دما ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد. از نظر ساختار زمین‌شناسی بیش از ۸۵ درصد از سطح حوضه را سنگ‌های آذرآواری و توفی همراه با سنگ‌های آتشفشانی و آهک ناخالص تشکیل می‌دهند که نفوذپذیری زیادی دارند. حوضه معرف ناورود شامل دو ایستگاه هیدرومتری درجه یک، خرجگیل (خروجی حوضه) و خلیان (مرکز ثقل) است که مشخصات آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، موقعیت و نقشه توپوگرافی حوضه در شکل ۱ نشان داده شده است.

داشت، صورت گرفت و نتایج آنها مشابه هم بود [۱۸]. ابوشاندی و مرکل با به‌کارگیری مدل مفهومی متریک IHACRES برای حوضه خشک وادی دولیل^۱ در شمال شرقی اردن ۱۹ واقعه بارش رگباری از سال ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۲ را بررسی کردند. تخمین سیلاب در مقیاس روزانه و در مقیاس رویدادهای رگباری انجام گرفت؛ که عملکرد مدل برای شبیه‌سازی در مقیاس روزانه ضعیف بود و در عوض، مدل عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی رویدادهای رگباری نشان داد [۱۹]. ابوشاندی و مرکل با هدف توسعه چارچوبی جدید برای به‌کارگیری مدل بارش رواناب در حوضه‌های خشک به دنبال تکمیل داده‌های ماهواره‌ای اصلاح‌شده بارش برای تعیین محل رگبار بودند. آنها یک رویداد بارش در حوضه خشک وادی دولیل اردن، که اطلاعات آن به‌صورت ساعتی موجود بود، را در IHACRES و HEC-HMS مدل‌سازی کردند. مدل IHACRES عملکرد ضعیفی در شبیه‌سازی داده‌های ساعتی نسبت به مدل HEC-HMS نشان داد. به طوری که ضریب کارایی مدل نش - ساتکلیف آنها به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۸۸ به دست آمد [۲۰]. الریدیسی مدل IHACRES را به‌منظور برنامه‌ریزی هیدرولوژیکی و ارزیابی منابع آب آفریقا به‌عنوان مدلی کم‌هزینه پیشنهاد کرد؛ که قابلیت به‌کارگیری در حوضه‌های فاقد آمار و مقایسه آن با حوضه‌هایی مشابه که آمار آنها موجود است را دارد [۲۱]. قنبرپور و همکارانش با به‌کارگیری ARMA, ANN, SWRRB و IHACRES به شبیه‌سازی و تخمین رواناب حوضه جنگلی کسلیان با فقدان اطلاعات آب و هواشناسی کافی پرداختند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده عملکرد مناسب IHACRES و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بود [۲۲].

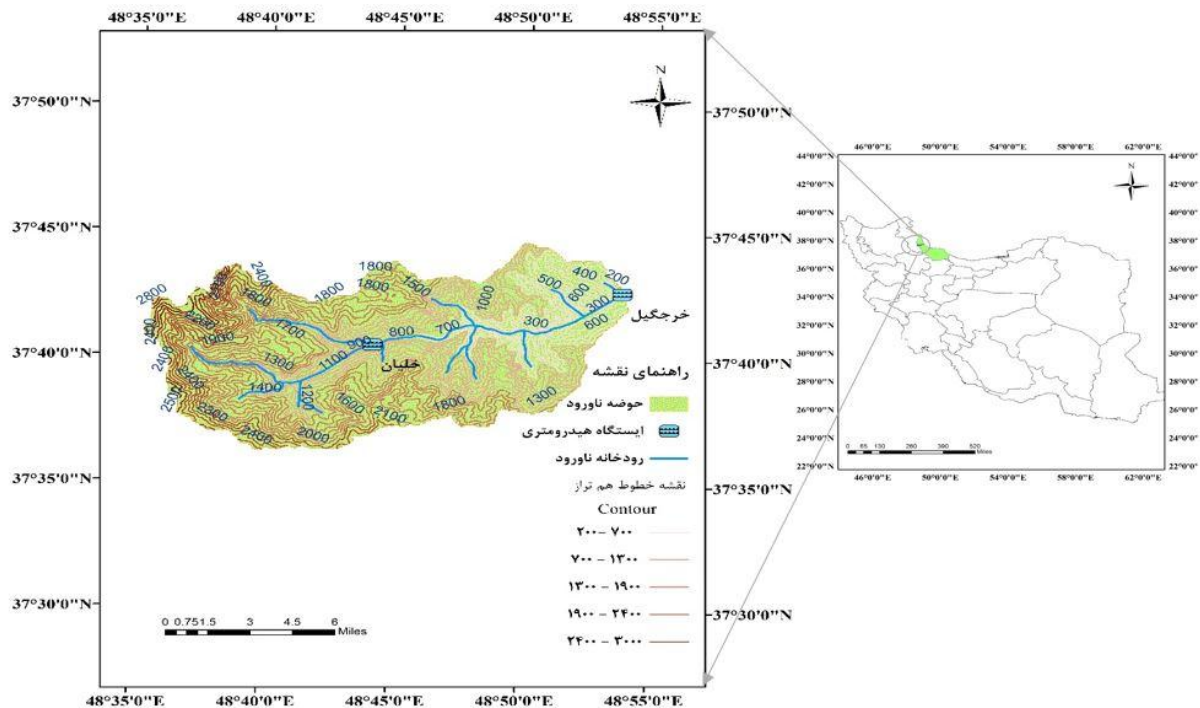
با توجه به مطالب گفته‌شده، مدل IHACRES با دریافت کمترین اطلاعات (بارش، دما و دبی روزانه) قادر به مدل‌سازی رواناب تولیدی با دقت قابل قبولی است. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی کارایی مدل IHACRES در مدل‌سازی فرایند بارش - رواناب در مقیاس روزانه در حوضه ناورود است. به این منظور ابتدا داده‌های روزانه مورد نیاز از سازمان آب منطقه‌ای گیلان دریافت شد. سپس، به مدل‌سازی بارش - رواناب با اطلاعات دبی، دما و بارش روزانه پرداخته شد. دوره کالیبراسیونی که در آن بهترین معیارهای

2. Pettit test

1. Wadi Dhuliel

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های حوضه ناورود

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
خرجگیل	آبسنجی درجه یک	۴۸°۵۳'۴۴"	۳۷°۴۲'۴۰"	۱۳۰
خلیان	آبسنجی درجه یک	۴۸°۴۴'۰۷"	۳۷°۴۰'۳۰"	۷۶۰



شکل ۱. موقعیت حوضه ناورود گیلان و ایستگاه‌های هیدرومتری آن [۴]

و سه ساله، دوره زمانی سه ساله، که طولانی تر بود، برای کالیبراسیون و دوره زمانی دوساله برای صحت سنجی انتخاب شدند. البته، عکس این حالت نیز بررسی شد، ولی مشاهده شد که معیارهای ارزیابی (BIAS، E، و ARPE) برای حالت اول مقادیر بهتری را نشان می دهند.

مدل IHACRES

مدل IHACRES که توسط جیکمن و هورن برگر (۱۹۹۳) ارائه شده، یک مدل یکپارچه مفهومی برای شبیه سازی بارش- رواناب است و برای اجرا در انواع حوضه های کوچک تا بزرگ با مساحت های متنوع از ۴۹۰ مترمربع تا ۱۰ هزار کیلومترمربع در انگلستان استفاده شده است و نتایج قابل قبولی را ارائه داده است [۲۳]. در این پژوهش از نسخه IHACRES2.1 استفاده شده است که برای حوضه های دارای داده های پیوسته بارشی، دما و رواناب کاربرد دارد. مدل شامل دو مدول غیرخطی و خطی است. سری

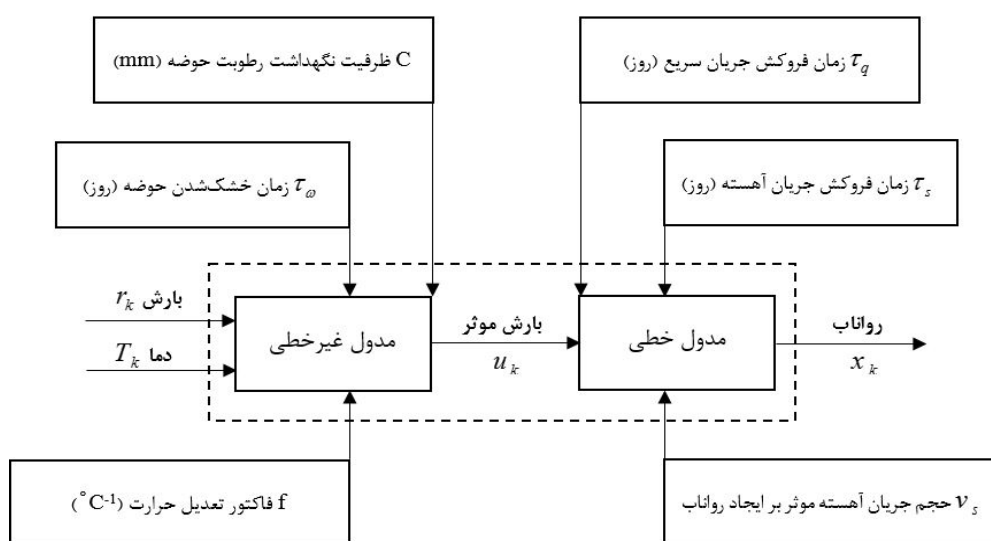
در تحقیق حاضر از آمار روزانه دبی ایستگاه خرجگیل و آمار روزانه بارش و دمای ایستگاه خلیان بین مهر ۱۳۸۱ و مهر ۱۳۹۴ استفاده شد. که از مهر ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۴ به عنوان دوره کالیبراسیون، و از مهر ۱۳۸۷ تا مهر ۱۳۸۹ به عنوان دوره صحت سنجی استفاده شد. سری های زمانی بارش و دبی اندازه گیری شده در حوضه ناورود قدمت بیشتری نسبت به سری زمانی تهیه شده مربوط به دما دارد، بنابراین طول دوره سری زمانی دما (۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴) مبنای محاسبات قرار گرفت. همچنین، برای افزایش دقت محاسبات هیچ گونه داده ای در سری های زمانی تولید نشد، ضمن اینکه در این دوره زمانی داده ها کامل بودند و هیچ خلأ آماری مشاهده نشد. با استفاده از آزمون نقطه شکست پیتت مشاهده شد که بعد از سال ۱۳۸۴ هیچ گونه نقطه شکستی در سری های زمانی بارش و دبی وجود ندارد و با توجه به آمار دما در دو دوره زمانی دو

سریع، τ_s زمان فروکش جریان آهسته، v_s حجم جریان آهسته مؤثر بر ایجاد رواناب است. در مدل خطی به دو روش می‌توان عمل کرد یا مدول خطی را به صورت خودکار کالیبره کرد و یا کاربر به صورت دستی باید متغیرهای قابل استفاده مدل را تعیین کند.

در انتخاب دوره کالیبراسیون باید به این نکته توجه داشت که دوره انتخابی باید مقادیر دبی‌های حداقل، متوسط و حداکثر را در بر گیرد [۲۳].

ساختار مدل IHACRES در شکل ۲ نشان داده شده است.

زمانی بارش r_k و سری زمانی دما T_k به وسیله مدول غیرخطی به بارش مؤثر u_k و به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد تبدیل به رواناب می‌شوند. مدل IHACRES دارای شش پارامتر است که سه پارامتر آن مربوط به بخش تلفات غیرخطی است، C ظرفیت نگهداشت رطوبت حوضه، τ_ω زمان خشک شدن حوضه، f فاکتور تعدیل دما حوضه و کاربر با کالیبره کردن مقادیر τ_ω و f به بهترین مقدار ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف می‌رسد و سه پارامتر آن مربوط به هیدروگراف واحد یا تابع تعدیل است، τ_q زمان فروکش جریان



شکل ۲. ساختار مدل IHACRES [۴]

τ_k شدت خشکی حوضه است که تابعی از دمای محیط است و از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\tau_k = \tau_\omega \exp(f(T_{ref} - T_k) \times 0.062) \quad (3)$$

که در رابطه ۳ τ_ω شدت خشکی خاک مینا، f تابع تعدیل دما، T_{ref} دمای مرجع، T_k دما در بازه زمانی k است [۱۵].

تبدیل بارش مؤثر به رواناب (مدول خطی)

از اجتماع جریان آهسته $x_k^{(s)}$ و جریان سریع $x_k^{(q)}$ رواناب x_k حاصل می‌شود؛ که از رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} x_k^{(s)} &= -\alpha_s x_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k \\ x_k^{(q)} &= -\alpha_q x_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k \quad x_k = x_k^{(q)} + x_k^{(s)} \end{aligned} \quad (4)$$

تبدیل بارش به بارش مؤثر

S_k شاخص رطوبتی خاک حوضه است که بنا به خشک یا خیس بودن حوضه، مقدار آن به ترتیب بین صفر تا یک است. یعنی اگر پیش از بارندگی حوضه به کلی مرطوب باشد، تمام بارش به بارش مؤثر تبدیل می‌شود.

$$u_k = [c(\phi_k - l)]^p r_k \quad (2) \quad u_k = S_k \times r_k \quad (1)$$

C (ظرفیت نگهداشت رطوبت حوضه برحسب میلی‌متر)، l حد آستانه شاخص رطوبت خاک، p فاکتور مدول غیرخطی، ϕ_k شاخص رطوبت خاک و r_k بارندگی است.

$$\phi_k = r_k + [1 - 1/\tau_k] \phi_{k-1} \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1^{(q)} \alpha_1^{(s)} \quad \alpha_1 = \alpha_1^{(q)} + \alpha_1^{(s)} \quad (10)$$

$$b_0 = b_0^{(q)} + b_0^{(s)} \quad b_1 = b_0^{(q)} \alpha_1^{(s)} + b_0^{(s)} \alpha_1^{(q)}$$

نتایج

در تحقیق حاضر برای مدل سازی فرایند تولید رواناب در IHACRES از داده های روزانه دما و بارش ایستگاه خلیان در مرکز ثقل حوضه و دبی ایستگاه خرگیل در خروجی حوضه بین سال های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ استفاده شد. ابتدا، آزمون نقطه شکست (pettitt's Test) به تفکیک روی سری زمانی داده های دبی، دما و بارش مشاهداتی انجام شد.

آزمون نقطه شکست شامل دو فرض است:

فرض H_0 : سری زمانی داده ها نقطه شکست ندارد.

فرض H_1 : تاریخی وجود دارد که در آن داده ها تغییر

می کنند (روند آن ها تغییر می کند).

نتایج در شکل های ۳ تا ۵ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، نقطه شکست دبی روزانه مشاهداتی در تاریخ ۲۷ ژوئن ۲۰۰۵ (۶ تیر ۱۳۸۴) است. نقطه شکست داده های دما ۲۸ آوریل ۲۰۰۹ (۸ اردیبهشت ۱۳۸۸) است و داده های بارش فاقد نقطه شکست در کل دوره آمار موجود (۲۰۰۳-۲۰۱۵) است.

بنابراین، برای انتخاب دوره کالیبراسیون باید دوره زمانی که هر سه داده (دبی، دما و بارش) نقطه شکست ندارند، مد نظر قرار گیرد. از این رو، برای داده های استفاده شده اطلاعات بین سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ تا انتهای سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ به عنوان دوره کالیبراسیون، و اطلاعات بین سال های آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸ تا سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ نیز به عنوان دوره صحت سنجی استفاده شد. نتایج دوره کالیبراسیون، صحت سنجی و پارامترهای بهینه بخش های خطی و غیر خطی IHACRES به ترتیب در جدول های ۲ و ۳ آمده است. نمودارهای دوره زمانی کالیبراسیون، صحت سنجی و کل دوره شبیه سازی نیز به ترتیب در شکل های ۶ تا ۸ آمده است.

α_q و β_q ثابت زمانی جریان سریع، α_s و β_s ثابت زمانی جریان آهسته اند و از رابطه ۵ به دست می آیند.

$$\tau_s = -\Delta / \ln(-\alpha_s) \quad \Delta \quad \tau_q = -\Delta / \ln(-\alpha_q) \quad (5)$$

بازه زمانی، τ_q و τ_s نیز به ترتیب زمان فروکش جریان سریع و آهسته بر حسب روز هستند [۲۳].

$$v_q = 1 - v_s = \frac{\beta_q}{1 + \alpha_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1 + \alpha_s} \quad (6)$$

معیارهای ارزیابی

ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف از رابطه ۷ به دست می آید که ارتباط میان مجذور مربعات خطا و واریانس مقادیر مشاهداتی را بیان می کند و نشان می دهد دبی های جریان تا چه حد توسط مدل درست شبیه سازی شده اند. مقدار آن از مقادیر منفی تا یک متغیر است و زمانی که میزان آن یک باشد، نشان دهنده انطباق کامل بین هیدروگراف های مشاهده ای است.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_c^i - Q_o^i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o^i - \bar{Q}_o)^2} \quad (7)$$

جایی که Q_c^i مقدار i امین دبی محاسباتی، Q_o^i مقدار i امین دبی مشاهداتی و \bar{Q}_o متوسط مقادیر دبی های مشاهداتی است.

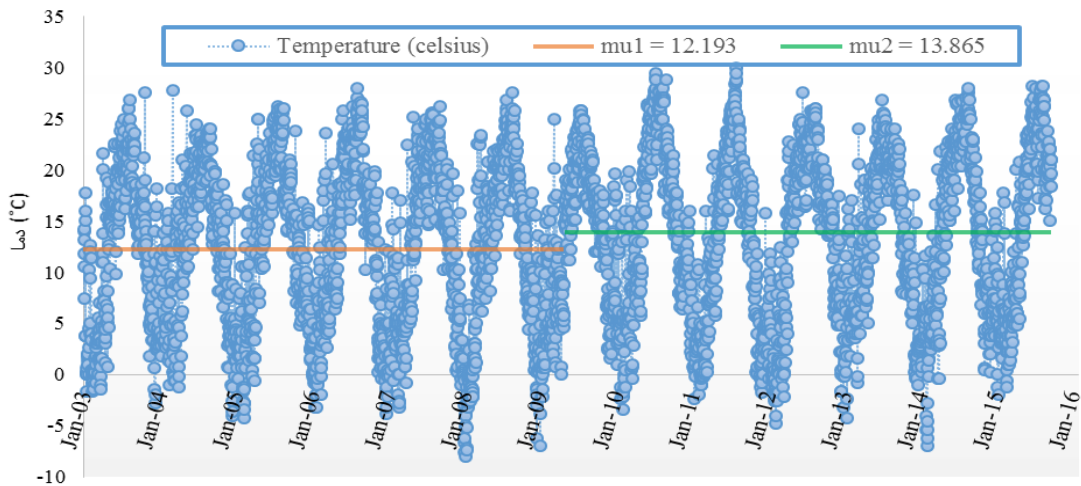
میانگین خطای کل از رابطه ۸ محاسبه می شود:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o^i - Q_c^i)}{N} \quad (8)$$

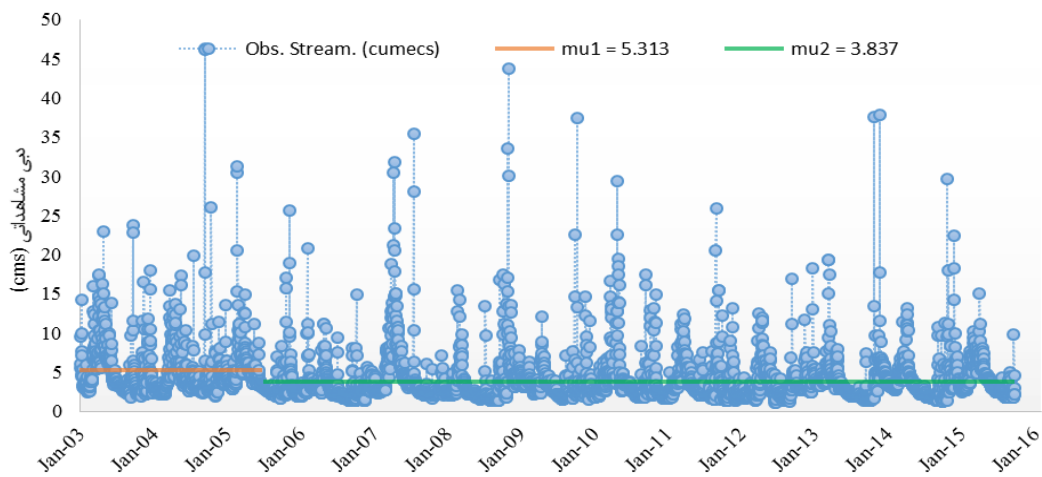
میانگین خطای نسبی پارامتریک^۱، از رابطه ۹ به دست می آید. هرچه مقدار آن کمتر باشد، نشان دهنده دقت بیشتر مدل سازی است [۱۴].

$$ARPE = \left[\left(\frac{\sigma_{\alpha_1}}{\alpha_1} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\alpha_2}}{\alpha_2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{b_1}}{b_1} \right)^2 \right] / 4 \quad (9)$$

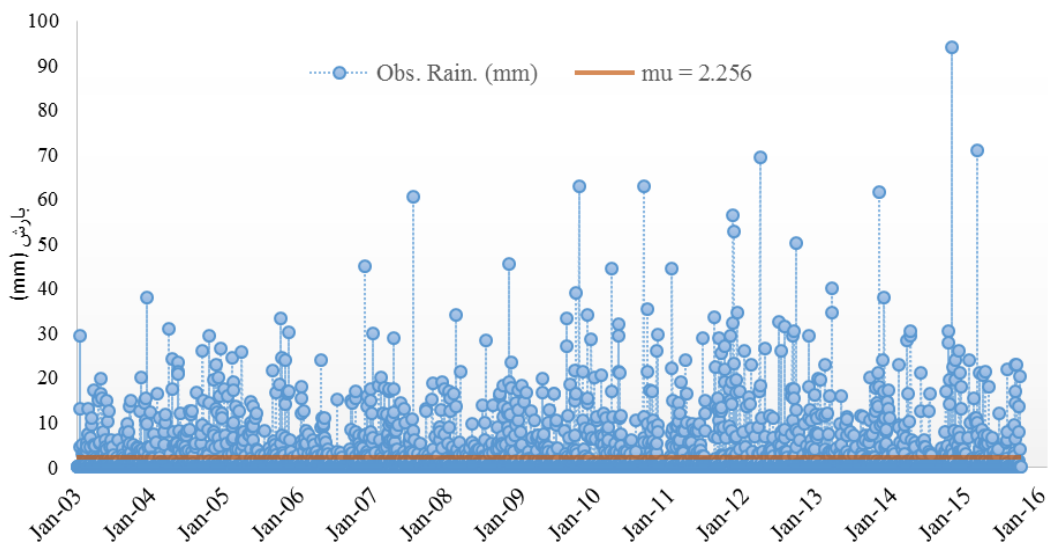
σ انحراف معیار، α_1 ، α_2 ، b_0 و b_1 پارامترهای مرتبه دوم تابع انتقال در مدول خطی اند که به صورت رابطه ۱۰ بیان می شوند [۱۳].



شکل ۳. نتیجه آزمون نقطه شکست دمای مشاهداتی در کل دوره (۲۰۱۵-۲۰۰۳)



شکل ۴. نتیجه آزمون نقطه شکست دبی مشاهداتی در کل دوره (۲۰۱۵-۲۰۰۳)



شکل ۵. نتیجه آزمون نقطه شکست بارش مشاهداتی در کل دوره (۲۰۱۵-۲۰۰۳)

جدول ۲. نتایج عملکرد مدل در دوره‌های کالیبراسیون و صحت‌سنجی

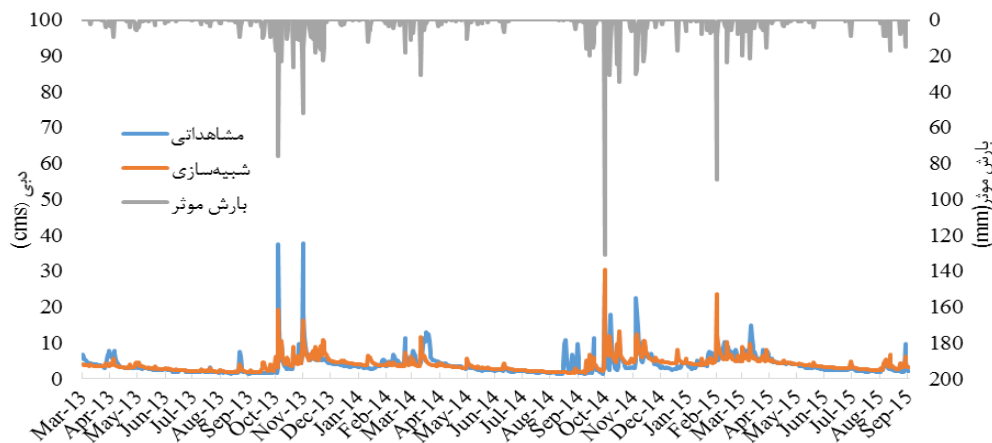
دوره	(E)	BIAS (mm/year)	ARPE
کالیبراسیون	۰/۵۵	-۱۰/۱	۰/۰۸۸
صحت‌سنجی	۰/۴۶	۲۰/۱۶	۰/۰۲۷

جدول ۳. مقادیر بهینه پارامترهای خطی و غیرخطی IHACRES در دوره کالیبراسیون

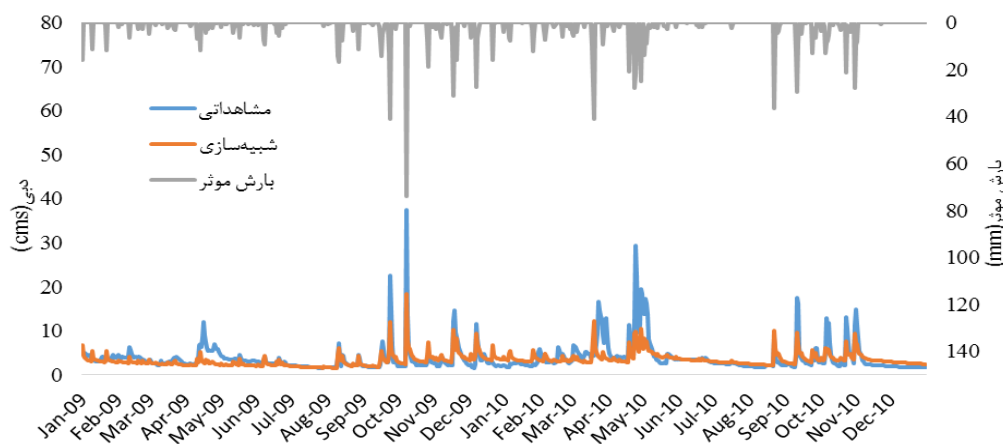
مدول خطی			مدول غیرخطی		
V_s حجم جریان آهسته مؤثر بر ایجاد رواناب (روز)	T_s زمان فروکش جریان آهسته (روز)	T_q زمان فروکش جریان سریع (روز)	C ظرفیت نگهداشت رطوبت حوضه (mm)	f فاکتور تعدیل دما ($^{\circ}C^{-1}$)	T_{θ} زمان خشک شدن حوضه (روز)
۰/۷۹۲	۱۵۶/۷۶	۳/۲۷	۰/۰۰۵۲	۰/۲	۲۷

ظرفیت نفوذ خاک، جز در شرایط بارندگی شدید بیشتر شده و در نتیجه جریان زیر سطحی فرایند مکانیسم عمده انتقال آب باران به رودخانه محسوب می‌شود.

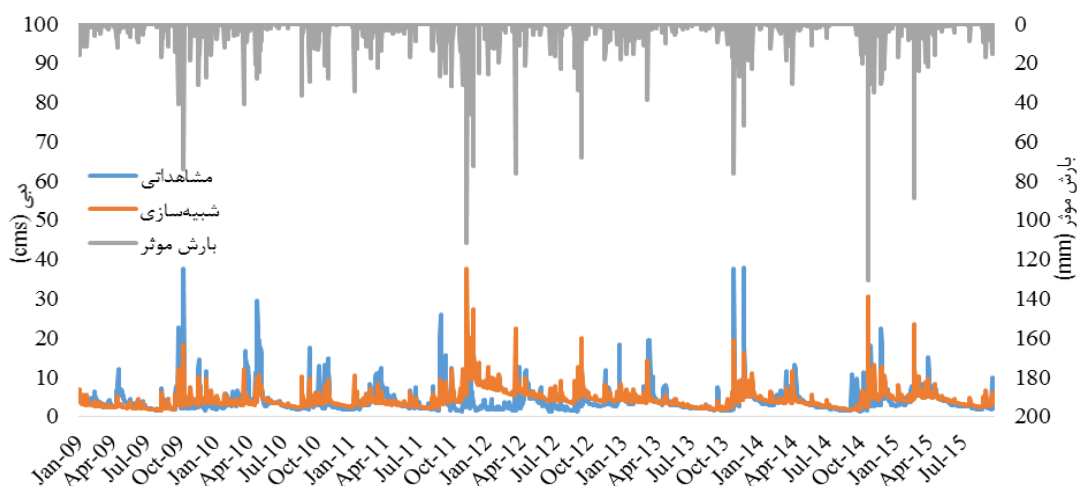
پارامتر V_s نشان دهنده مشارکت جریان پایه در جریان رودخانه است. در مناطق مرطوب و جنگلی به خلاف مناطق خشک و شهری بیشتر جریان جذب خاک می‌شود و به جریان‌های زیر سطحی می‌پیوندد. در چنین شرایطی



شکل ۶. نمودار شبیه‌سازی جریان در دوره کالیبراسیون



شکل ۷. نمودار شبیه‌سازی جریان در دوره صحت‌سنجی



شکل ۸. نمودار شبیه‌سازی جریان در کل دوره مطالعاتی

اطمینان یک و پنج درصد بیشتر باشد فرض صفر پذیرفته می‌شود. در اینجا نیز میانگین دبی‌های مشاهده‌ای با دبی‌های شبیه‌سازی شده توسط IHACRES برابرند (جدول ۴).

جدول ۴. آزمون t مقایسه دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط IHACRES

متغیر	P-Value	alpha	t (Critical value)
رواناب	۰/۴۷۹	۰/۰۵	۱/۹۶۱

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف ۰/۵۵ به دست آمده (جدول ۲). طبق توصیه زو و همکارانش اگر مقادیر ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف در ارزیابی مدل بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد نتایج قابل قبول و در صورتی که این مقدار بیش از ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی شده عالی است [۲۴]. با توجه به نتایج مدل که تا حد قابل قبولی جریان را شبیه‌سازی کرده است، نتیجه به دست آمده با نتایج محققانی که پژوهش آنها روی حوضه ناورود بود و مقدار ضریب کارایی مدل نش-ساتکلیف و میانگین خطای کل را برای دوره کالیبراسیون به ترتیب ۰/۵۷ و ۸/۵۳ میلی‌متر در سال به دست آوردند، مطابقت دارد [۴، ۹ و ۱۰]. پارامتر v_s نشان دهنده مشارکت جریان پایه در ایجاد جریان رودخانه است (جدول ۳). هرچه مقدار آن بیشتر باشد، بیان‌کننده وجود جریان پایه درخور توجهی در رودخانه است که این نتیجه با نتایج

با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸ می‌توان به نتیجه زیر دست یافت:

مدل IHACRES در شبیه‌سازی تک‌واقعه بارش-رواناب قادر است که دبی پیک سیلاب را با دقت زیادی شبیه‌سازی کند. در شبیه‌سازی پیوسته بارش-رواناب در حوضه‌های مناطق خشک و حوضه‌هایی که دبی آنها اندک است، چون دبی به مقدار زیادی به رگبارها وابسته است باز این مدل قادر است که دبی‌های پیک سیلاب را به خوبی شبیه‌سازی کند به این دلیل استفاده از این مدل در این مناطق توصیه شده است، ولی در حوضه‌های مرطوب، مانند حوضه ناورود، که دبی سالانه بیشتر به جریان پایه رودخانه، آب‌های زیرزمینی و ذوب برف وابسته است، این مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق دبی‌های پیک سیلابی نیست ولی چون بیشتر دبی حاصل از عوامل یادشده است، این مدل می‌تواند حجم سیلاب را به خوبی شبیه‌سازی کند [۶، ۹ و ۱۰].

به منظور بررسی بیشتر دقت مدل‌سازی، آزمون مقایسه میانگین‌ها برای مقایسه میانگین داده‌های روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به کار گرفته شد. که این آزمون نیز دو فرض دارد:

فرض H_0 : اختلاف میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای صفر است.

فرض H_1 : اختلافی میان میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد.

به این منظور، از آزمون t-استیودنت استفاده شد. در این آزمون اگر مقدار P-Value از مقدار alpha در سطوح

انجام شده در حوضه‌های مناطق مرطوب و جنگلی کشور می‌توان دقت خوب IHACRES در شبیه‌سازی رواناب این حوضه‌ها داشت.

منابع

- [1]. Goodarzi MR, Zahabiyou B, Massah Bavani AR, Kamal AR. Performance comparison of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the runoff simulation of Ghareosu basin. *Journal of Water and Irrigation Management (Journal of Agriculture)*. 2012; 2(1): 25-40. [Persian]
- [2]. Ashofteh P, Massah Bouani AR. Impact of climate change on maximum discharges: case study of Aidoghmouth Basin, East Azerbaijan. *JWSS - Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*. 2010; 14(53): 28-38. [Persian]
- [3]. Hosseini SH, Ghorbani MA, Massah Bavani A. Raifall-runoff modelling under the climate change condition in order to project future streamflows of sufichay watershed. *Journal of Watershed Management Research*. 2015; 6(11): 1-14. [Persian]
- [4]. Sadeghi SH, Ghasemieh H, Sadatinegad SJ. Performance evaluation of the IHACRES hydrological model in wet areas (case study: Navrud Basin, Gillan). *JWSS - Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*. 2015; 19(73): 73-83. [Persian]
- [5]. Nash JE, Sutcliffe JV. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *J hydrol*. 1970; 10(3): 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- [6]. Amiri E, Roudbari Mousavi MM. Evaluation of IHACRES hydrological model for simulation of daily flow (case study Polrood and Shalmanrood rivers). *Iranian Journal of Eco Hydrology*. 2016; 3(4): 533-543. [Persian]
- [7]. Yaghoubi M, Massah Bavani AR. Sensitivity analysis and comparison of capability of three conceptual models HEC-HMS, HBV and IHACRES in simulating continuous rainfall-runoff in semi-arid basins. *Journal of the Earth and Space Physics*. 2014; 40(2): 153-172. [Persian]
- [8]. Dye PJ, Croke BFW. Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environ Modell Softw*. 2003; 18(8-9): 705-712. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00072-0)

پژوهش‌های امیری و رودباری موسوی، صادقی و همکارانش، خیرفام و همکارانش و دوستی و همکارانش مطابقت دارد. τ_q و τ_s که به ترتیب زمان فروکش جریان سریع و زمان فروکش جریان آهسته برحسب روز هستند و برای حوضه ناورود به ترتیب ۳/۲۷ و ۱۵۶/۷۶ روز به دست آمده است (جدول ۳). که واکنش سریع حوضه به جریان سریع را نشان می‌دهد. C ظرفیت نگهداشت رطوبت حوضه برحسب میلی‌متر است و نشان از سرعت واکنش حوضه نسبت به بارندگی دارد. به صورتی که اگر مقدار کم این شاخص بیان کننده واکنش آهسته‌تر حوضه نسبت به بارندگی و به عکس مقدار زیاد آن نشان دهنده واکنش سریع حوضه نسبت به بارندگی است. نتایج به دست آمده درباره شاخص C که مقدار آن (۰/۰۰۵۲) کم است (جدول ۳)، نیز نشان از سرعت واکنش کند حوضه نسبت به بارندگی دارد که این امر را می‌توان به پوشش گیاهی جنگلی حوضه که موجب ایجاد تأخیر در پیوستن بارش به جریان رودخانه می‌شود، نسبت داد. صادقی و همکارانش [۴] نیز درباره حوضه ناورود به این نکته اشاره کرده‌اند. دوستی و همکارانش [۱۰] نیز جنگلی بودن بخشی از حوضه تمر را علت کم بودن مقدار شاخص C بیان کرده‌اند. مقادیر مثبت و منفی میانگین خطای کل به ترتیب بیان کننده کمتر و بیشتر بودن دبی شبیه‌سازی شده نسبت به دبی مشاهداتی است. بنابراین، جریان شبیه‌سازی شده در دوره کالیبراسیون ۱۰/۱ میلی‌متر در سال بیشتر از مقادیر مشاهداتی است. در دوره صحت‌سنجی نیز جریان شبیه‌سازی شده ۲۰/۱۶ میلی‌متر کمتر از مقدار مشاهداتی در همان دوره است (جدول ۲). که با توجه به نتیجه پژوهش دای و کروک [۸] در دو حوضه آفریقای جنوبی دقت خوب مدل در شبیه‌سازی جریان را می‌رساند. میانگین خطای نسبی پارامتریک نسبتاً کم هم بیان کننده دقت قابل قبول شبیه‌سازی دبی روزانه است (جدول ۲). همان‌گونه که در شکل‌های دوره‌های کالیبراسیون و صحت‌سنجی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است، مدل در شبیه‌سازی دبی‌های حداکثر دقت خوبی ندارد که به این مورد در نتایج پژوهش‌های خیرفام و همکارانش [۹] در زیر حوضه‌های گرگان‌رود، دوستی و همکارانش [۱۰] در حوضه تمر و امیری و رودباری موسوی [۶] در حوضه پل‌رود هم اشاره شده است. پیش از این‌ها، مدل IHACRES برای استفاده در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک توصیه می‌شد، ولی با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش و تحقیقات

- [9]. Kheirfam H, Mostafazadeh R, Sadeghi SHR. Daily discharge prediction using IHACRES model in some watersheds of Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research*. 2013; 4(7): 114-127. [Persian]
- [10]. Dousti M, Shahedi K, Habibnezhad Roshan M, Miryaghoubzade MH. Using IHACRES semi-conceptual model to simulate daily flow (case study: Tamar Basin). *Journal of Water and Soil Conservation*. 2014; 21(2): 277-292. [Persian]
- [11]. Ye W, Bates BC, Viney NR, Sivapalan M, Jakeman AJ. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resour Res*. 1997; 33(1): 153-166. DOI: 10.1029/96WR02840
- [12]. Hansen DP, Ye W, Jakeman AJ, Cooke R, Sharma P. Analysis of the effect of rainfall and streamflow data quality and catchment dynamics on streamflow prediction using the rainfall-runoff model IHACRES. *Environ Softw*. 1996; 11(1-3): 193-202. [https://doi.org/10.1016/S0266-9838\(96\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0266-9838(96)00048-2)
- [13]. Littlewood IG. Improved unit hydrograph characterisation of the daily flow regime (including low flows) for the River Teifi, Wales: towards better rainfall-streamflow models for regionalisation. *Hydrol Earth Syst Sc*. 2002; 6(5): 899-911. doi:10.5194/hess-6-899-2002, 2002.
- [14]. Littlewood IG, Clarke RT, Collischonn W, Croke BFW. Predicting daily streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environ Modell Softw*. 2007; 22(9): 1229-1239. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.07.004>
- [15]. Carcano EC, Bartolini P, Muselli M, Piroddi L. Jordan recurrent neural network versus IHACRES in modelling daily streamflows. *J hydrol*. 2008; 362(3-4): 291-307. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.026>
- [16]. Croke BFW, Jakeman AJ. A catchment moisture deficit module for the IHACRES rainfall-runoff model. *Environ Modell Softw*. 2004; 19(1): 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.09.001>
- [17]. Chapman TG. Modelling stream recession flows. *Environ Modell Softw*. 2003; 18(8-9): 683-692. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00070-7)
- [18]. Javeed Y, Apoorva KV. Flow regionalization under limited data availability—application of IHACRES in the Western Ghats. *Aquat Procedia*. 2015; 4: 933-941. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.117>
- [19]. Abushandi EH, Merkel BJ. Application of IHACRES rainfall-runoff model to the Wadi Dhuliel arid catchment, Jordan. *J Water Clim Change*. 2011; 2(1): 56-71. DOI: 10.2166/wcc.2011.048
- [20]. Abushandi E, Merkel B. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Water Resour Manag*. 2013; 27(7): 2391-2409. DOI: 10.1007/s11269-013-0293-4
- [21]. Alredaisy SMAH. Recommending the IHACRES model for water resources assessment and resolving water conflicts in Africa. *J Arid Land*, 2011; 3(1): 40-48. doi: 10.3724/SP.J.1227.2011.00040
- [22]. Ghanbarpour MR, Amiri M, Zarei M, Darvari Z. Comparison of stream flow predicted in a forest watershed using different modelling procedures: ARMA, ANN, SWRRB, and IHACRES models. *Int J river basin manag*. 2012; 10(3): 281-292. <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2012.699893>
- [23]. Jakeman AJ, Hornberger GM. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resour Res*. 1993; 29(8): 2637-2649. DOI: 10.1029/93WR00877
- [24] Xu ZX, Pang JP, Liu CM, Li JY. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. *Hydrol Process*. 2009; 23(25): 3619-3630. DOI: 10.1002/hyp.7475