اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۵، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۷، ص ۴۶۰-۴۴۹

تخمین رواناب روزانه به کمک مدل نیمه‌مفهومی IHACRES در حوضهٔ آبریز ناورود گیلان

مرتضی لطفی راد[۱]، آرش ادیب[۲*]، علی حقیقی[۲]

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

۲. دانشیار گروه عمران، دانشکدهٔ 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 دربارهٔ میزان دبی جریان در حوضهٔ آبریز است تا با توجه به دبی سیلاب طراحی بتوان تصمیم‌گیری کرد. بنابراین، بهره‌گیری از مدل‌های شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب که علاوه بر دقت خوب، به اطلاعات ورودی کمی نیز نیاز دارند، بااهمیت است. مدل IHACRES از مدل‌های نیمه‌مفهومی 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 حوضهٔ ناورود گیلان به کمک مدل IHACRES با استفاده از داده‌های دبی روزانهٔ ایستگاه خرجگیل در خروجی حوضه و نیز داده‌های بارش و دمای روزانهٔ ایستگاه خلیان در مرکز ثقل حوضه طی دورهٔ ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ به‌عنوان دورهٔ کالیبراسیون و دورهٔ ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ نیز به‌عنوان دورهٔ 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 به‌دست‌آمدهٔ E در دورهٔ کالیبراسیون و صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۴۶ به دست آمد که با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین قابل قبول است.

کلیدواژگان: بارش، رواناب، حوضهٔ آبریز ناورود، ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف، مدل IHACRES.

* نویسندهٔ مسئول

Email: arashadib@yahoo.com

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 به‌دست‌آمده 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 مقرون‌به‌صرفه نبودن جمع‌آوری برخی داده‌ها، از مدل‌هایی که از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه 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 به‌مراتب 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 حوضهٔ قره‌سو را ارزیابی و مقایسه کردند. از جمله معیارهای ارزیابی در این مطالعه، ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف و ریشهٔ میانگین مربعات خطا[1] (RMSE) هستند. دوره‌های مشترک شبیه‌سازی این سه مدل از یک بازهٔ ۳۰ ساله انتخاب شدند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد SWAT با ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف[2] ۰/۸ و ریشهٔ میانگین مربعات خطای ۱/۲ میلی‌متر در سال و SIMHYD با ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف ۰/۶۸ و ریشهٔ میانگین مربعات خطای ۵/۱ میلی‌متر در سال، به‌ترتیب بیشترین و کمترین کارایی را در دورهٔ کالیبراسیون دارند. این مقادیر برای دورهٔ 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 دورهٔ صحت‌یابی داشته است [۱]. آشفته و مساح بوانی ابتدا داده‌های بارش و دمای مربوط به حوضهٔ آیدوغموش را در دورهٔ دور پیش‌بینی اقلیمی کردند و سپس به منظور برآورد رژیم حداکثر دبی سالانه (شدت و فراوانی) به کمک مدل IHACRES رواناب حاصل از داده‌های آتی را مدل‌سازی کردند؛ که در دورهٔ بازگشت‌های زیاد شدت دبی حداکثر افزایش، ولی احتمال وقوع آن کاهش می‌یابد [۲]. حسینی و همکارانش با درنظرگرفتن ساختارهای مختلف به‌کارگیری پارامترهای دبی، بارش و دما از ایستگاه‌های موجود حوضهٔ صوفی‌چای، به مدل‌سازی فرایند بارش- رواناب در مدل IHACRES و شبیه‌سازی فرایند با برنامه‌ریزی ژنتیک در شرایطی که تغییر اقلیم با سناریوهای مختلفی اقلیمی و غیر اقلیمی لحاظ شود، پرداختند. همچنین، عدم قطعیت انتخاب سناریوهای انتشار مختلف برای دورهٔ نزدیک، کم و برای اواسط قرن، بیشتر است [۳].

صادقی و همکارانش کارایی مدل IHACRES در شبیه‌سازی روزانهٔ رواناب حوضهٔ ناورود با استفاده از ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف و میانگین خطای کل را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میزان ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف و میانگین خطای کل در دورهٔ کالیبراسیون به‌ترتیب ۰/۵۷ و ۸/۵۳ میلی‌متر در سال و در مرحلهٔ آزمون ۰/۴۸ و ۱۴/۹ میلی‌متر در سال است. بنا بر نتایج به‌دست‌آمده، مدل استفاده‌شده نشان داد دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی جریان حوضهٔ 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 روزانهٔ رودخانه‌های پل‌رود و شلمان‌رود در استان گیلان را، که در منطقهٔ مرطوب واقع است، بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان دهندهٔ انحرافات کم مدل در شبیه‌سازی مقادیر روزانهٔ دبی است. با درنظرگرفتن 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 پیوستهٔ HEC-HMS، HBV و IHACRES در شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضهٔ نیمه‌خشک اعظم هرات را ارزیابی کردند. در تعیین عملکرد مدل‌ها از معیارهای عملکرد شامل ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف، میانگین خطای کل و ریشهٔ میانگین مربعات خطا استفاده شد. درنهایت، مشخص شد مدل HBV بهترین عملکرد در شبیه‌سازی رواناب پیوستهٔ حوضه را دارد [۷].

دای و کروک نیز در پژوهش خود در دو حوضهٔ لامبرشتسبوس[3] و گروت- نیل ریور[4] در آفریقای جنوبی به

1. Root Mean Square Error
2. Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient
3. Lambrechtsbos
4. Groot-Nylrivier

پیش‌بینی جریان به کمک مدل IHACRES پرداختند. در حوضهٔ لامبرشتسبوس در دو دورهٔ قبل و بعد از جنگل‌کاری ضرایب کارایی مدل نش- ساتکلیف آنها به‌ترتیب بیش از ۰/۸۱ و ۰/۸۱ به دست آمد؛ و مقدار اختلاف دبی شبیه‌سازی و مشاهداتی (میانگین خطای کل) به‌ترتیب ۲۵/۸ و ۸/۴ میلی‌متر در سال به دست آمد که دقت مدل را نشان می‌داد [۸]. خیرفام و همکارانش با شبیه‌سازی متوسط دبی روزانهٔ جریان با استفاده از مدل IHACRES و ارزیابی کارایی آن در هفت زیرحوضهٔ رودخانهٔ گرگان‌رود استان گلستان به این نتیجه رسیدند که معیارهای کارایی نشان دهندهٔ توانایی مدل در برآورد مقادیر زیاد دبی روزانه بود، ولی در بیشتر حوضه‌ها نتایج برآورد مقادیر دبی با فراوانی ۶۰ درصد ضعیف بود. درمجموع، نتایج مدل در تعدادی از زیرحوضه‌های مطالعه‌شده با ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف و کارایی حداکثر ۰/۶۷ و ۰/۷ نسبتاً قابل قبول ارزیابی شد [۹]. دوستی و همکارانش با شبیه‌سازی بارش- رواناب حوضهٔ تمر با IHACRES به ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف ۰/۶۶ و میانگین خطای کل ۳/۴۱۲ میلی‌متر در سال طی دورهٔ کالیبراسیون، و ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف ۰/۶۱ و میانگین خطای کل ۰/۴۱۶ میلی‌متر در سال در دورهٔ صحت‌سنجی رسیدند که عملکرد رضایت‌بخش مدل در حوضه را بیان می‌کند [۱۰].

یه و همکارانش رواناب را در حوضه‌های کم‌آبده استرالیا، که رودخانه‌های آنها به صورت فصلی جریان داشتند و تخمین آبدهی آنها دشوارتر از حوضه‌های مرطوب بود، بررسی کردند. آنها از سه مدل بارش رواناب شامل GSFB، IHACRES و LASCAM (مدل پیچیده‌تر) در سه حوضه با آبدهی کم فصلی به‌صورت روزانه و ماهانه استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل سادهٔ GSFB برای شبیه‌سازی داده‌های ماهانه مناسب‌تر است؛ و مدل IHACRES برای مدل‌سازی روزانهٔ حوضه‌های خشک و همچنین حوضه‌های با آبدهی کم نیز مناسب است [۱۱]. هانسن و همکارانش عوامل مؤثر بر کیفیت تخمین رواناب شبیه‌سازی‌شده با مدل IHACRES را به کمک اطلاعات بارش و تبخیر روزانهٔ یک دورهٔ ۱۰۰ ساله در هشت حوضهٔ بزرگ در استرالیا بررسی کردند [۱۲].

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 شبیه‌سازی بارش رواناب در مقیاس روزانه، نشان دادند مدل ساده، که مبتنی بر هیدروگراف واحد است، برای کالیبره‌شدن نیاز به اطلاعات کمتر مانند دبی، بارش و دمای هوا دارد، ولی مدل پیچیده علاوه بر این اطلاعات، نیاز به تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی و خاک دارد. این در حالی است که نتیجهٔ مدل‌سازی هر دو مدل مشابه‌اند [۱۳ و ۱۴]. کارکانو و همکارانش با مقایسهٔ مدل مفهومی IHACRES با دو مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی بازسازی‌شده مدل شبکهٔ عصبی چندلایهٔ پرسپترون[1] (MLP) و شبکهٔ عصبی بازگشتی جردن[2] (JNN) و با تأکید بر بازسازی دوره‌های خشکسالی که برای مدیریت منابع آب ضروری است، دو حوضهٔ کوچک با رژیم نامنظم و سیلابی را مدل‌سازی کردند. آنها با ترکیب JNN و تکنیک اثر حافظه به نتایج درخور توجهی در شبیه‌سازی رواناب از داده‌های بارش و دبی گذشته به کمک شبکهٔ عصبی رسیدند و بیان کردند که در شرایطی که اطلاعات ورودی مناسب در دست نیست، روش‌های متریک بهتر از مفهومی عمل می‌کنند [۱۵]. کروک و جکمن با تغییر مدول غیرخطی به‌کاررفته در مدل IHACRES که مختص محاسبهٔ بارش مؤثر است، درصدد تخمین رواناب در حوضه‌های فاقد آمار و زمانی که به اطلاعات تبخیر تعرق واقعی نیاز است، برآمدند. این نسخهٔ جدید نیاز به سه پارامتر (بارش، دما و تبخیر تعرق) دارد که همبستگی آنها به یکدیگر کمتر از نسخهٔ قبلی است [۱۶]. چاپمن اثر جریان بازگشتی در مدل‌سازی فرایند بارش - رواناب در مدل‌های توصیفی، که به تغذیهٔ آب زیرزمینی منجر می‌شود، را بررسی کرد. از طرفی، مقدار این تغذیه خود وابسته به جریان سطحی است. تحقیق او روی ۲۲ حوضهٔ معرف در استرالیا صورت گرفت و به این نتیجه رسید که معادلهٔ به‌کاررفته در مدل IHACRES برای جریان بازگشتی که شامل دو تابع‌نمایی است، برازش خوبی بر داده‌ها دارد [۱۷]. جاوید و آپروا به کمک مدل IHACRES رواناب شش حوضهٔ فاقد آمار در هندوستان را مدل‌سازی کردند و برای صحت‌سنجی نیز مدل‌سازی جریان روزانه روی یک حوضهٔ دارای آمار، که شرایط هیدرولوژیکی مشابه شش حوضه را

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

داشت، صورت گرفت و نتایج آنها مشابه هم بود [۱۸]. ابوشاندی و مرکل با به‌کارگیری مدل مفهومی متریک IHACRES برای حوضهٔ خشک وادی دولیل[1] در شمال شرقی اردن ۱۹ واقعهٔ 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 توسعهٔ چارچوبی جدید برای به‌کارگیری مدل بارش رواناب در حوضه‌های خشک به دنبال تکمیل داده‌های ماهواره‌ای اصلاح‌شدهٔ بارش برای تعیین محل رگبار بودند. آنها یک رویداد بارش در حوضهٔ 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 به‌ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۸۸ به دست آمد [۲۰]. الردیسی مدل IHACRES را به‌منظور برنامه‌ریزی هیدرولوژیکی و ارزیابی منابع آب آفریقا به‌عنوان مدلی کم‌هزینه پیشنهاد کرد؛ که قابلیت به‌کارگیری در حوضه‌های فاقد آمار و مقایسهٔ 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 حوضهٔ جنگلی کسیلیان با فقدان اطلاعات آب و هواشناسی کافی پرداختند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کنندهٔ عملکرد مناسب IHACRES و شبکهٔ 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 حوضهٔ ناورود است. به این منظور ابتدا داده‌های روزانهٔ مورد نیاز از سازمان آب منطقه‌ای گیلان دریافت شد. سپس، به مدل‌سازی بارش-رواناب با اطلاعات دبی، دما و بارش روزانه پرداخته شد. دورهٔ کالیبراسیونی که در آن بهترین معیارهای ارزیابی (E، BIAS وARPE) را تأمین می‌کنند، انتخاب می‌شود. مقادیر بهینهٔ پارامترهای مدول غیرخطی نیز در مدل‌سازی به دست آمد. سپس، دورهٔ 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 حوضهٔ آبریز ناورود انجام شده‌اند و معیارهای ارزیابی مانند نش ـ 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 ـ رواناب است تا دورهٔ زمانی انتخاب‌شده بدون شکست باشد. از این‌رو، از آزمون نقطهٔ شکست پیتت[2] استفاده شد. همچنین، در این تحقیق انتهای دورهٔ زمانی استفاده‌شده، سال آبی ۱۳۹۳ـ ۱۳۹۴ است که نسبت به پژوهش صادقی و همکارانش از آمار به‌روزتری بهره گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه‌شده

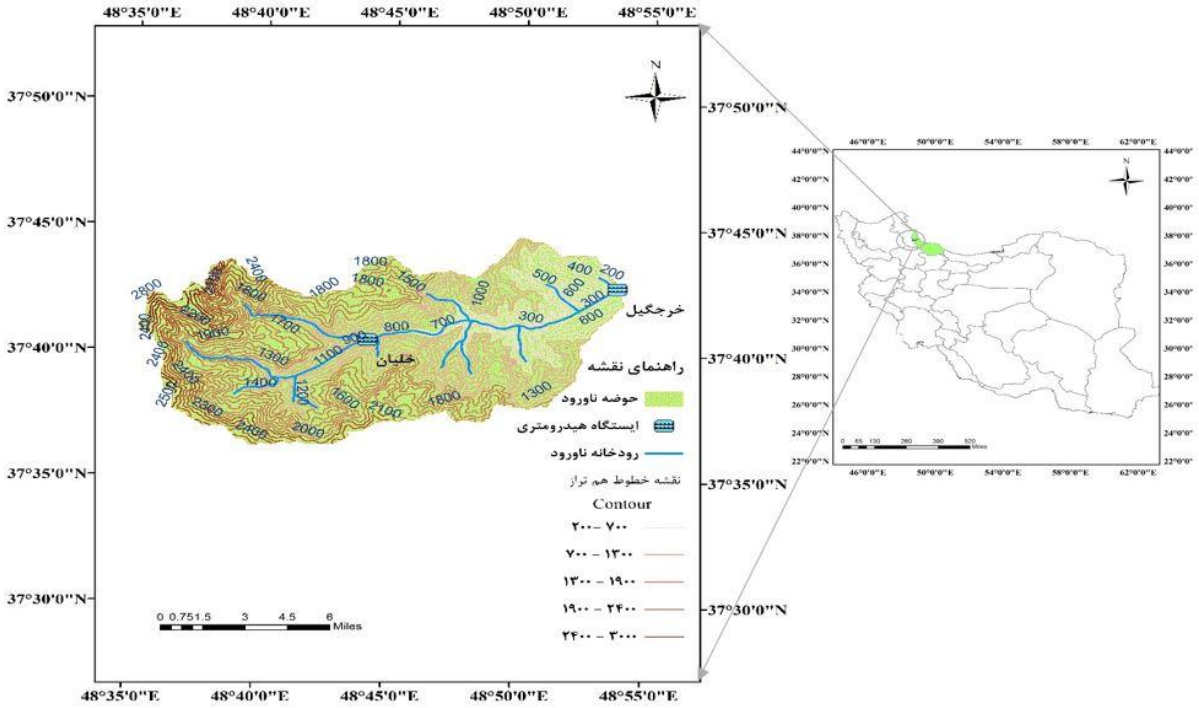
حوضهٔ معرف ناورود، حوضه‌ای جنگلی- کوهستانی با مساحت ۲۷۴ کیلومترمربع و محیط ۷۸ کیلومتر واقع در کوه‌های تالش و بین طول‌های جغرافیایی ۳۵ ۴۸ تا ۵۴ ۴۸ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ ۳۷ تا ۴۵ ۳۷ شمالی در شهرستان تالش استان گیلان واقع است. بیشترین ارتفاع حوضه ۲۸۰۰ متر، ارتفاع متوسط حوضه ۱۳۹۴ متر و کمترین ارتفاع حوضه ۱۳۰ متر است. طول آبراههٔ 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 درجهٔ 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. حوضهٔ معرف ناورود شامل دو ایستگاه هیدرومتری درجهٔ یک، خرجگیل (خروجی حوضه) و خلیان (مرکز ثقل) است که مشخصات آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، موقعیت و نقشهٔ توپوگرافی حوضه در شکل ۱ نشان داده شده است.

1. Wadi Dhuliel

2. Pettit test

جدول ۱.مشخصات ایستگاه‌های حوضهٔ ناورود

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



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

در تحقیق حاضر از آمار روزانهٔ دبی ایستگاه خرجگیل و آمار روزانهٔ بارش و دمای ایستگاه خلیان بین مهر ۱۳۸۱ و مهر ۱۳۹۴ استفاده شد. که از مهر ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۴ به‌عنوان دورهٔ کالیبراسیون، و از مهر ۱۳۸۷ تا مهر ۱۳۸۹ به‌عنوان دورهٔ صحت‌سنجی استفاده شد. سری‌های زمانی بارش و دبی اندازه‌گیری‌شده در حوضهٔ ناورود قدمت بیشتری نسبت به سری زمانی تهیه‌شده مربوط به دما دارد، بنابراین طول دورهٔ سری زمانی دما (۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴) مبنای محاسبات قرار گرفت. همچنین، برای افزایش دقت محاسبات هیچ‌گونه داده‌ای در سری‌های زمانی تولید نشد، ضمن اینکه در این دورهٔ زمانی داده‌ها کامل بودند و هیچ خلأ آماری مشاهده نشد. با استفاده از آزمون نقطهٔ شکست پیت مشاهده شد که بعد از سال ۱۳۸۴ هیچ‌گونه نقطهٔ شکستی در سری‌های زمانی بارش و دبی وجود ندارد و با توجه به آمار دما در دو دورهٔ زمانی دو و سه ساله، دورهٔ زمانی سه‌ساله، که طولانی‌تر بود، برای کالیبراسیون و دورهٔ زمانی دوساله برای صحت‌سنجی انتخاب شدند. البته، عکس این حالت نیز بررسی شد، ولی مشاهده شد که معیارهای ارزیابی (E، BIAS و ARPE) برای حالت اول مقادیر بهتری را نشان می‌دهند.

مدل IHACRES

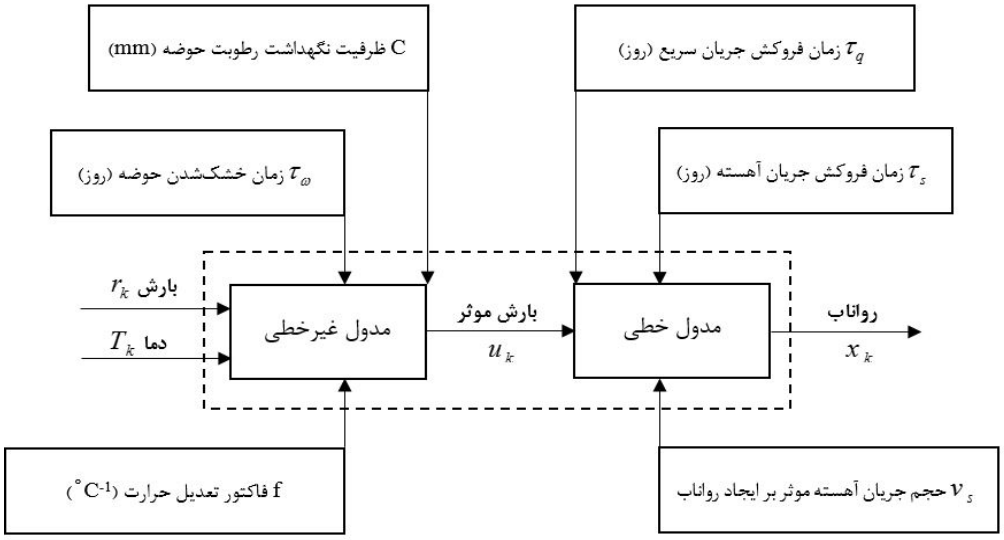
مدل IHACRES که توسط جیکمن و هورن برگر (۱۹۹۳) ارائه شده، یک مدل یکپارچهٔ مفهومی برای شبیه‌سازی بارش- رواناب است و برای اجرا در انواع حوضه‌های کوچک تا بزرگ با مساحت‌های متنوع از ۴۹۰ مترمربع تا ۱۰ هزار کیلومترمربع در انگلستان استفاده شده است و نتایج قابل قبولی را ارائه داده است [۲۳]. در این پژوهش از نسخهٔ IHACRES2.1 استفاده شده است که برای حوضه‌های دارای داده‌های پیوسته بارشی، دما و رواناب کاربرد دارد.

مدل شامل دو مدول غیرخطی و خطی است. سری

زمانی بارش r_k و سری زمانی دما T_k به‌وسیلهٔ مدول غیرخطی به بارش مؤثر u_k و به‌وسیلهٔ 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 خشک‌شدن حوضه، f فاکتور تعدیل دما حوضه و کاربر با کالیبره‌کردن 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 سریع، τ_s زمان فروکش جریان آهسته، v_s حجم جریان آهستهٔ مؤثر بر ایجاد رواناب است. در مدل خطی به دو روش می‌توان عمل کرد یا مدول خطی را به‌صورت خودکار کالیبره کرد و یا کاربر به‌صورت دستی باید متغیرهای قابل استفاده مدل را تعیین کند.

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

ساختار مدل IHACRES در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. ساختار مدل IHACRES [۴]

تبدیل بارش به بارش مؤثر

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

$$u_k = S_k \times r_k \quad (۱)$$

$$u_k = [c(\phi_k - l)]^p r_k \quad (۲)$$

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

$$\phi_k = r_k + [1 - 1/\tau_k]\phi_{k-1} \quad (۲)$$

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

$$\tau_k = \tau_\omega \exp(f(T_{ref} - T_k) \times 0.062) \quad (۳)$$

که در رابطهٔ ۳ τ_ω شدت خشکی خاک مبنا، f تابع تعدیل دما، T_{ref} دمای مرجع، T_k دما در بازهٔ 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 رابطهٔ ۴ به دست می‌آید.

$$x_k^{(s)} = -\alpha_s x_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k$$
$$x_k^{(q)} = -\alpha_q x_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k \quad x_k = x_k^{(q)} + x_k^{(s)} \quad (۴)$$

α_q و β_q ثابت زمانی جریان سریع، α_s و β_s ثابت زمانی جریان آهسته‌اند و از رابطهٔ ۵ به دست می‌آیند.

$$\tau_s = -\Delta / \ln(-\alpha_s) \;\; \Delta\ \tau_q = -\Delta / \ln(-\alpha_q) \qquad (۵)$$

بازهٔ زمانی، τ_q و τ_s نیز به‌ترتیب زمان فروکش جریان سریع و آهسته برحسب روز هستند [۲۳].

$$v_q = 1 - v_s = \frac{\beta_q}{1+\alpha_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1+\alpha_s} \qquad (۶)$$

معیارهای ارزیابی

ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف از رابطهٔ ۷ به دست می‌آید که ارتباط میان مجذور مربعات خطا و واریانس مقادیر مشاهداتی را بیان می کند و نشان می‌دهد دبی‌های جریان تا چه حد توسط مدل درست شبیه‌سازی شده‌اند. مقدار آن از مقادیر منفی تا یک متغیر است و زمانی که میزان آن یک باشد، نشان‌دهندهٔ انطباق کامل بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای است.

$$E = ۱ - \frac{\sum_{i=۱}^{N} (Q_c^i - Q_o^i)^۲}{\sum_{i=۱}^{N} (Q_o^i - \overline{Q_o})^۲} \qquad (۷)$$

جایی که Q_c^i مقدار i امین دبی محاسباتی، Q_o^i مقدار i امین دبی مشاهداتی و $\overline{Q_o}$ متوسط مقادیر دبی‌های مشاهداتی است.

میانگین خطای کل از رابطهٔ ۸ محاسبه می‌شود:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=۱}^{N} (Q_o^i - Q_c^i)}{N} \qquad (۸)$$

میانگین خطای نسبی پارامتریک[1]، از رابطهٔ ۹ به دست می‌آید. هرچه مقدار آن کمتر باشد، نشان‌دهندهٔ دقت بیشتر مدل‌سازی است [۱۴].

$$ARPE = \left[\left(\frac{\sigma_{\alpha_۱}}{\alpha_۱}\right)^۲ + \left(\frac{\sigma_{\alpha_۲}}{\alpha_۲}\right)^۲ + \left(\frac{\sigma_{b_۰}}{b_۰}\right)^۲ + \left(\frac{\sigma_{b_۱}}{b_۱}\right)^۲ \right] / ۴ \qquad (۹)$$

σ انحراف معیار، α_1، α_2، b_0 و b_1 پارامترهای مرتبهٔ دوم تابع انتقال در مدول خطی‌اند که به‌صورت رابطهٔ ۱۰ بیان می‌شوند [۱۳].

$$\alpha_2 = \alpha_1^{(q)}\alpha_1^{(s)} \;\; \alpha_1 = \alpha_1^{(q)} + \alpha_1^{(s)}$$
$$b_0 = b_0^{(q)} + b_0^{(s)} \;\; b_1 = b_0^{(q)}\alpha_1^{(s)} + b_0^{(s)}\alpha_1^{(q)} \qquad (۱۰)$$

نتایج

در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی فرایند تولید رواناب در IHACRES از داده‌های روزانهٔ دما و بارش ایستگاه خلیان در مرکز ثقل حوضه و دبی ایستگاه خرجگیل در خروجی حوضه بین سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ استفاده شد. ابتدا، آزمون نقطهٔ شکست (pettitt's Test) به تفکیک روی سری زمانی داده‌های دبی، دما و بارش مشاهداتی انجام شد.

آزمون نقطهٔ شکست شامل دو فرض است:

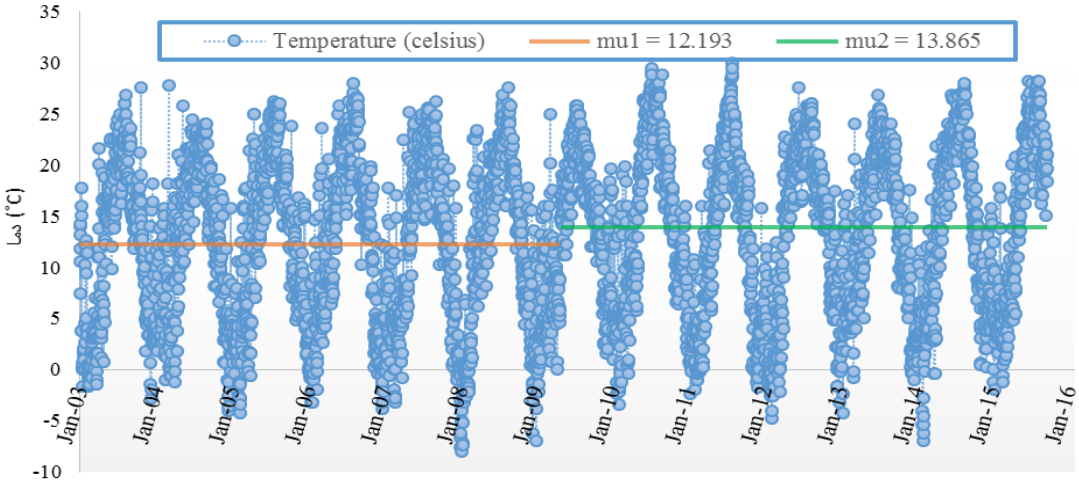
فرض H_0: سری زمانی داده‌ها نقطهٔ شکست ندارد.

فرض H_1: تاریخی وجود دارد که در آن داده‌ها تغییر می‌کنند (روند آن‌ها تغییر می‌کند).

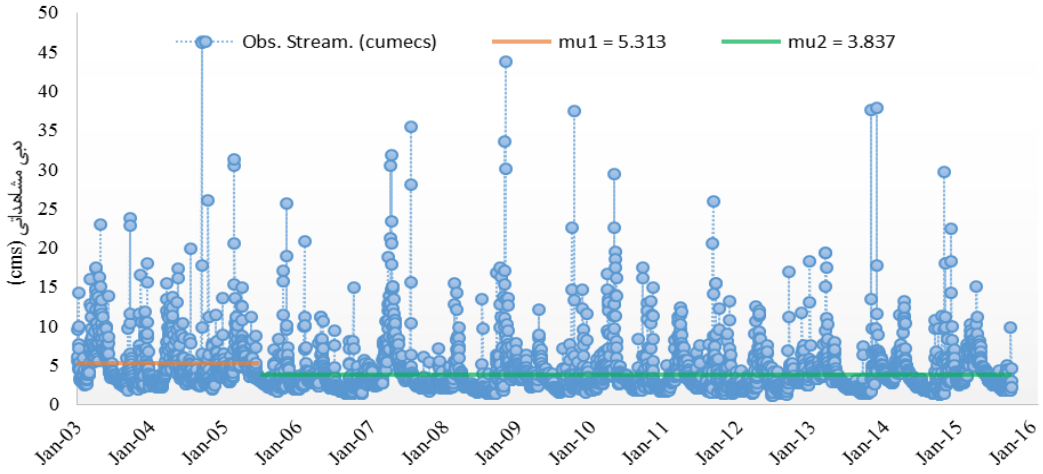
نتایج در شکل‌های ۳ تا ۵ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نقطهٔ شکست دبی روزانه مشاهداتی در تاریخ ۲۷ ژوئن ۲۰۰۵ (۶ تیر ۱۳۸۴) است. نقطهٔ شکست داده‌های دما ۲۸ آوریل ۲۰۰۹ (۸ اردیبهشت ۱۳۸۸) است و داده‌های بارش فاقد نقطهٔ شکست در کل دورهٔ آمار موجود (۲۰۰۳- ۲۰۱۵) است.

بنابراین، برای انتخاب دورهٔ کالیبراسیون باید دورهٔ زمانی که هر سه داده (دبی، دما و بارش) نقطهٔ شکست ندارند، مد نظر قرار گیرد. از این‌رو، برای داده‌های استفاده‌شده اطلاعات بین سال آبی ۱۳۹۱ــ ۱۳۹۲ تا انتهای سال آبی۱۳۹۳- ۱۳۹۴ به‌عنوان دورهٔ کالیبراسیون، و اطلاعات بین سال‌های آبی ۱۳۸۷- ۱۳۸۸ تا سال آبی ۱۳۸۹- ۱۳۹۰ نیز به‌عنوان دورهٔ صحت‌سنجی استفاده شد. نتایج دورهٔ کالیبراسیون، صحت‌سنجی و پارامترهای بهینهٔ بخش‌های خطی و غیرخطی IHACRES به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. نمودارهای دورهٔ زمانی کالیبراسیون، صحت‌سنجی و کل دورهٔ شبیه‌سازی نیز به‌ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۸ آمده است.

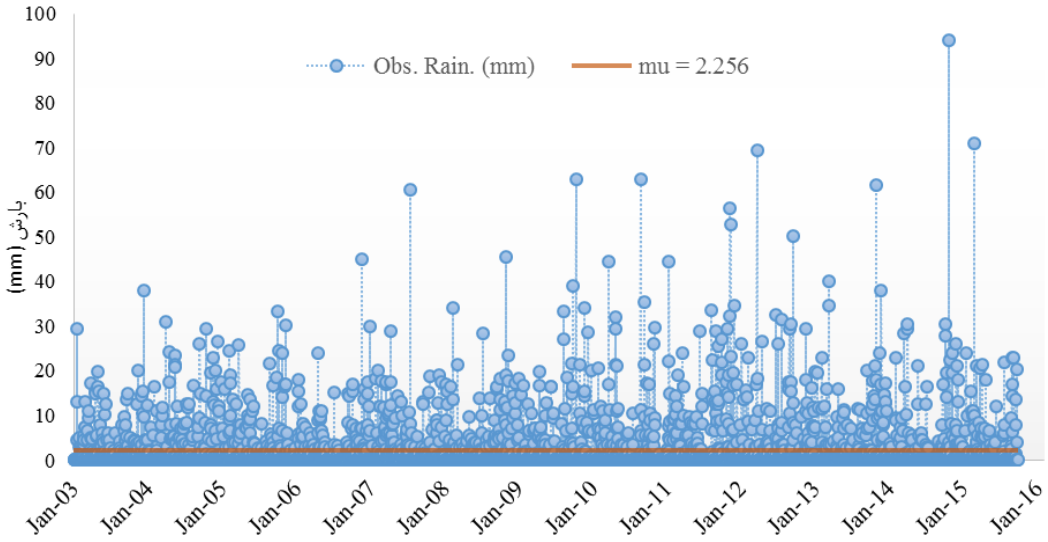
1. Average Relative Parameter Error



شکل ۳. نتیجهٔ آزمون نقطهٔ شکست دمای مشاهداتی در کل دوره (۲۰۰۳-۲۰۱۵)



شکل ۴. نتیجهٔ آزمون نقطهٔ شکست دبی مشاهداتی در کل دوره (۲۰۰۳-۲۰۱۵)



شکل ۵. نتیجهٔ آزمون نقطهٔ شکست بارش مشاهداتی در کل دوره (۲۰۰۳-۲۰۱۵)

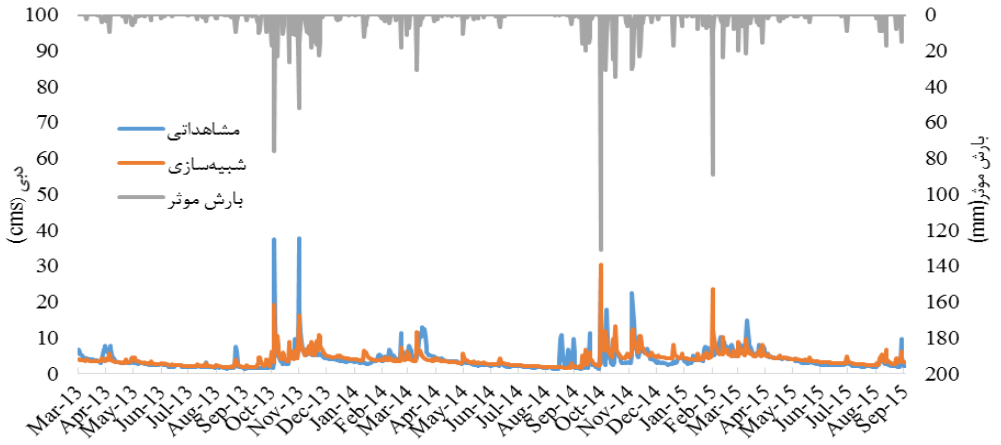
جدول ۲. نتایج عملکرد مدل در دوره‌های کالیبراسیون و صحت‌سنجی

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

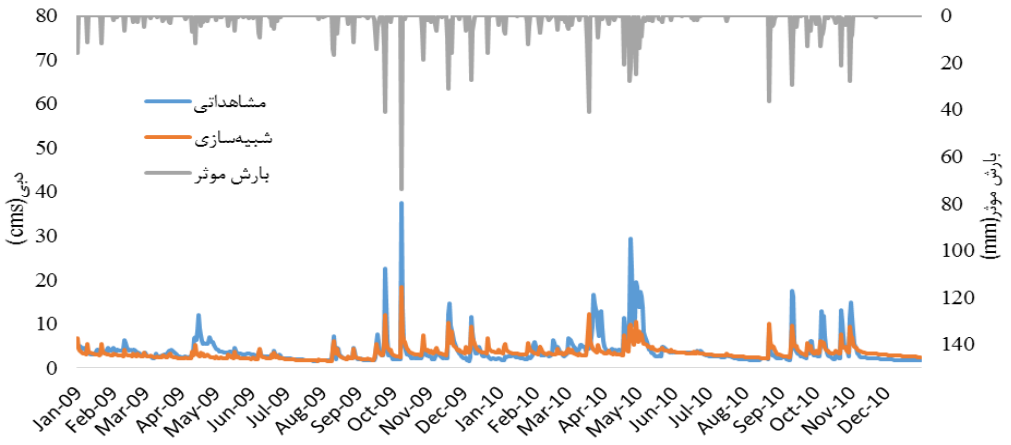
جدول ۳. مقادیر بهینهٔ پارامترهای خطی و غیرخطی IHACRES در دورهٔ کالیبراسیون

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

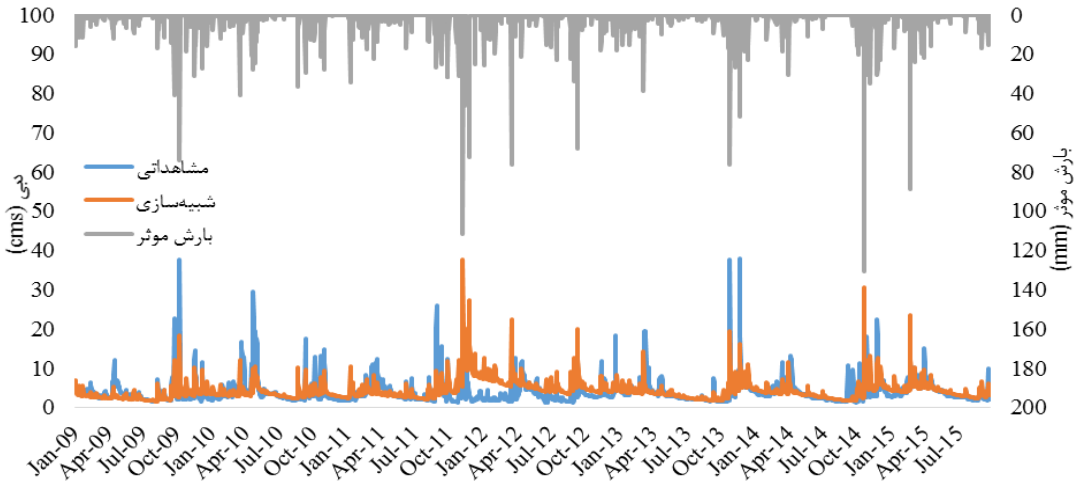
پارامتر Vs نشان‌دهندهٔ مشارکت جریان پایه در جریان رودخانه است. در مناطق مرطوب و جنگلی به خلاف مناطق خشک و شهری بیشتر جریان جذب خاک می‌شود و به جریان‌های زیر سطحی می‌پیوندد. در چنین شرایطی ظرفیت نفوذ خاک، جز در شرایط بارندگی شدید بیشتر شده و در نتیجه جریان زیر سطحی فرایند مکانیسم عمدهٔ انتقال آب باران به رودخانه محسوب می‌شود.



شکل ۶. نمودار شبیه‌سازی جریان در دورهٔ کالیبراسیون



شکل ۷. نمودار شبیه‌سازی جریان در دورهٔ صحت‌سنجی



شکل ۸. نمودار شبیه‌سازی جریان در کل دورهٔ مطالعاتی

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

مدل IHACRES در شبیه‌سازی تک‌واقعهٔ بارش- رواناب قادر است که دبی پیک سیلاب را با دقت زیادی شبیه‌سازی کند. در شبیه‌سازی پیوستهٔ 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 به‌خوبی شبیه‌سازی کند به این دلیل استفاده از این مدل در این مناطق توصیه شده است، ولی در حوضه‌های مرطوب، مانند حوضهٔ ناورود، که دبی سالانه بیشتر به جریان پایهٔ 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 به‌خوبی شبیه‌سازی کند [۶، ۹ و ۱۰].

به‌منظور بررسی بیشتر دقت مدل‌سازی، آزمون مقایسهٔ میانگین‌ها برای مقایسهٔ میانگین داده‌های روزانه مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده به کار گرفته شد.که این آزمون نیز دو فرض دارد:

فرض H_0: اختلاف میانگین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی صفر است.

فرض H_1: اختلافی میان میانگین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی وجود دارد.

به این منظور، از آزمون t- استیودنت استفاده شد. در این آزمون اگر مقدار P-Value از مقدار alpha در سطوح اطمینان یک و پنج درصد بیشتر باشد فرض صفر پذیرفته می‌شود. در اینجا نیز میانگین دبی‌های مشاهداتی با دبی‌های شبیه‌سازی‌شده توسط IHACRES برابرند (جدول ۴).

جدول ۴. آزمون t مقایسهٔ دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط IHACRES

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

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده ضریب کارایی مدل نش‌ـ ساتکلیف ۰/۵۵ به‌دست‌آمده (جدول ۲). طبق توصیهٔ زو و همکارانش اگر مقادیر ضریب کارایی مدل نش‌ـ ساتکلیف در ارزیابی مدل بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد نتایج قابل قبول و درصورتی‌که این مقدار بیش از ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی‌شده عالی است [۲۴]. با توجه به نتایج مدل که تا حد قابل قبولی جریان را شبیه‌سازی کرده است، نتیجهٔ به‌دست‌آمده با نتایج محققانی که پژوهش آنها روی حوضهٔ ناورود بود و مقدار ضریب کارایی مدل نش‌ـ ساتکلیف و میانگین خطای کل را برای دورهٔ کالیبراسیون به‌ترتیب ۰/۵۷ و ۸/۵۳ میلی‌متر در سال به دست آوردند، مطابقت دارد [۴، ۹ و ۱۰]. پارامتر v_s نشان‌دهندهٔ مشارکت جریان پایه در ایجاد جریان رودخانه است (جدول ۳). هرچه مقدار آن بیشتر باشد، بیان‌کنندهٔ وجود جریان پایهٔ درخور توجهی در رودخانه است که این نتیجه با نتایج

پژوهش‌های امیری و رودباری موسوی، صادقی و همکارانش، خیرفام و همکارانش و دوستی و همکارانش مطابقت دارد. τ_q و τ_s که به‌ترتیب زمان فروکش جریان سریع و زمان فروکش جریان آهسته برحسب روز هستند و برای حوضهٔ ناورود به‌ترتیب ۳/۲۷ و ۱۵۶/۷۶روز به‌دست‌آمده 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 بیان‌کنندهٔ واکنش آهسته‌تر حوضه نسبت به بارندگی و به عکس مقدار زیاد آن نشان دهندهٔ واکنش سریع حوضه نسبت به بارندگی است. نتایج به‌دست‌آمده دربارهٔ 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 دربارهٔ حوضهٔ ناورود به این نکته اشاره کرده‌اند. دوستی و همکارانش [۱۰] نیز جنگلی‌بودن بخشی از حوضهٔ تمر را علت کم‌بودن مقدار شاخص C بیان کرده اند. مقادیر مثبت و منفی میانگین خطای کل به‌ترتیب بیان کنندهٔ کمتر و بیشتر بودن دبی شبیه‌سازی‌شده نسبت به دبی مشاهداتی است. بنابراین، جریان شبیه‌سازی‌شده در دورهٔ کالیبراسیون ۱۰/۱ میلی‌متر در سال بیشتر از مقادیر مشاهداتی است. در دورهٔ صحت‌سنجی نیز جریان شبیه‌سازی‌شده ۲۰/۱۶ میلی‌متر کمتر از مقدار مشاهداتی در همان دوره است (جدول ۲). که با توجه به نتیجهٔ پژوهش دای و کروک [۸] در دو حوضهٔ آفریقای جنوبی دقت خوب مدل در شبیه‌سازی جریان را می‌رساند. میانگین خطای نسبی پارامتریک نسبتاً کم هم بیان‌کنندهٔ 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 حوضهٔ تمر و امیری و رودباری موسوی [۶] در حوضهٔ پل‌رود هم اشاره شده است. پیش از این‌ها، مدل IHACRES برای استفاده در حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک توصیه می‌شد، ولی با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش و تحقیقات انجام‌شده در حوضه‌های مناطق مرطوب و جنگلی کشور می‌توان دقت خوب IHACRES در شبیه‌سازی رواناب این حوضه‌ها داشت.

منابع

[1]. Goodarzi MR, Zahabiyoun B, Massah Bavani AR, Kamal AR. Performance comparison of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the runoff simulation of Gharesou 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 Aidoghmoush 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

[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

[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

[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

[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