

ارزیابی الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای در شبیه‌سازی جریان روزانه‌ی رود ساروق چای با استفاده از شبیه‌سازی IHACRES

آرمان عبدالهی پور^۱، صابر معظمی گودرزی^{۲*}، محمود ذاکری نیری^۳

چکیده

با توجه به کمبود ایستگاه‌های آسنجی در بیشتر حوضه‌های آبخیز کشور، توسعه‌ی روش‌هایی که بتوانند آینده‌ی را در مقیاس زمانی روزانه برآورد کنند، از موارد ضروری است که به بهبود اطلاعات مورد نیاز برای اهداف مدیریتی مرتبط با منابع آب منجر می‌گردد. این روش‌ها معمولاً از بارش به عنوان ورودی شبیه‌های آشناسی استفاده می‌کنند. جهت اندازه‌گیری بارش به عنوان متغیر اصلی در برآورد رواناب، می‌توان از الگوریتم‌های ماهواره‌ای، که دارای پوشش زمانی و مکانی مناسبی می‌باشند، استفاده کرد. شبیه‌های متعددی برای تخمین بده ارائه شده‌اند، که در این بین IHACRES یکی از انواع ساده‌ی آنهاست، که در آن تنها از داده‌های بارش و دما برای به دست آوردن رواناب استفاده می‌شود؛ بنابراین، در تحقیق حاضر ابتدا شبیه‌سازی جریان روزانه‌ی رود ساروق چای از حوضه‌ی آبخیز زربینه رود با کاربرد شبیه‌سازی IHACRES و داده‌های زمینی روزانه‌ی بارش، دما و آینده‌ی برای سالهای ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۷ انجام شد، و شبیه‌سازی در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی گردید. سپس جهت ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای در شبیه‌سازی بده، که هدف این تحقیق است، داده‌های ماهواره‌ای روزانه‌ی سه الگوریتم PERSIANN، TMPA-3B42V7 و CMORPH در فاصله‌ی سالهای ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۷ به عنوان ورودی شبیه‌سازی واسنجی شده مزبور مورد استفاده قرار گرفت. با در نظر گرفتن ضریب همبستگی CC، و شاخص‌های خطای RMSE، MAE و RBias برای ارزیابیها، نتایج گویای توانایی بالاتر الگوریتم TMPA-3B42V7 در شبیه‌سازی رواناب حوضه نسبت به دو الگوریتم دیگر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، جریان روزانه، الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای، IHACRES، حوضه‌ی آبخیز.

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران.
^۲ - استادیار، دکتری مهندسی عمران آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران.
^۳ - استادیار، دکتری مهندسی عمران آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران
 * - نویسنده مسوول مقاله: saber.moazami@gmail.com

مقدمه

از آن جا که بیشتر حوضه‌های آبخیز کشور فاقد ایستگاه آسنجی با آمار بلند مدت می باشند، استفاده از روشهایی که بتوان با کمک آنها اندازه‌ی رواناب حاصل از بارندگی را در حوضه های فاقد آمار، یا دارای آمار ناقص، تخمین زد، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. یکی از این روشها استفاده از شبیه‌های آشناسی در شبیه سازی بدهی جریان است، که از اولین مراحل اقدامات مدیریت و برنامه ریزی منابع آب می باشد (نجفی، ۱۳۸۷؛ بیون، ۲۰۰۱). در بین شبیه‌های بارش- رواناب، شبیه IHACRES یکی از شبیه‌های ساده با داده‌های ورودی کم برای تخمین بدهی حوضه‌های آبخیز می باشد (کروک و همکاران، ۲۰۰۶). این شبیه بر اساس رویکرد مفهومی مورد استفاده در آن، می تواند برای اهدافی از جمله بررسی اثرات دگرگونیهای اقلیمی، مانند تغییرات بارش، دما و نیز تغییرات ضریب رواناب مورد استفاده قرار گیرد (کارکانو و همکاران، ۲۰۰۸).

از طرفی بارندگی، کلیدی ترین متغیر ورودی در شبیه‌سازی آشناسی بوده و توزیع زمانی و مکانی آن تأثیر قابل توجهی بر جریانهای سطحی دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۳). اطلاع از توزیع زمانی و مکانی بارش و شناخت اثر آن بر بدهی رود از مواردی است که منجر به مدیریت صحیح منابع آب در یک حوضه آبخیز خواهد شد (صادقی و همکاران، ۱۳۸۴). در واقع برآورد نسبتاً دقیق و قابل اطمینان بارش، به عنوان متغیر اصلی شبیه‌های آشناسی، نقش مهمی در شبیه‌سازیها و پیش بینی آب نگارهای خروجی دارد (معظمی و همکاران، ۲۰۱۳). برای توسعه‌ی روشهای تخمین بارش با استفاده از تصاویر ماهواره ای، الگوریتم‌هایی با فن سنجش از دور^۱ ماهواره ای، در مقیاس جهانی و با توان تفکیک زمانی کمتر از ۳ ساعت و مکانی کوچکتر از ۰/۲۵ درجه ارائه شده اند، به گونه‌ای که امروزه یکی از منابع برآورد بارش در سطح جهانی، محصولات به دست آمده از الگوریتم‌های برآورد بارش ماهواره‌ای^۲ (SRE) می‌باشد (کتیرایی بروجردی، ۱۳۹۲). در حال حاضر بیشترین داده های بارش از ایستگاههای زمینی

باران سنجی گردآوری می شود. با این وجود، شبکه‌ی ایستگاههای اندازه گیری بارش در بیشتر مناطق و بویژه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، از پوشش مکانی خوبی برخوردار نبوده، و با توجه به نقطه ای بودن بارش اندازه گیری شده، نمی توانند بارش را به صورت سطحی نمایش دهند، که این امر محدودیت قابل توجهی برای کاربرد های آشناسی می باشد. از این رو، برآوردهای بارش ماهواره ای، که نواحی دارای شرایط گیتاشناسی مختلف را پوشش دهند، می‌توانند جایگزین مناسبی برای ایستگاههای بارانسنجی باشند (معظمی و همکاران، ۲۰۱۳). برای استفاده از این سری داده‌ها ابتدا لازم است که کیفیت و ویژگیهای خطای آنها در مکانهای مختلف ارزیابی شود؛ بنابراین، برآورد بارش با استفاده از ماهواره‌ها مراجع بسیار مهمی برای دستیابی به پایش کاملتری از بارندگی و منابع آب در کشور ایران، که ایستگاههای بارانسنجی آن بسیار پراکنده‌اند، می‌باشد (بارانی زاده و همکاران، ۱۳۹۰). بدین لحاظ، کارایی استفاده از الگوریتم- های بارش ماهواره ای در شبیه سازی رواناب، به عنوان داده‌های ورودی به شبیه‌های آشناسی، کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

لذا، در این تحقیق، ابتدا به واسنجی شبیه بارش - رواناب IHACRES V 2.1.0 و بررسی اندازه‌ی کارایی آن در شبیه سازی جریان روزانه‌ی رود ساروق چای از حوضه آبخیز زرینه رود پرداخته شد. در ادامه، برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره ای در شبیه‌سازی بدهی حوضه که هدف این تحقیق است، از گروه داده‌های ماهواره‌ای روزانه‌ی سه الگوریتم PERSIANN-TMPA، 3B42V7 و CMORPH به عنوان ورودی به شبیه واسنجی گردیده‌ی مزبور بهره‌وری شد.

مروری بر تحقیقات پیشین

در دو دهه‌ی گذشته، استفاده از الگوریتم‌های برآورد بارش ماهواره ای (SRE) به منظور اندازه گیری بارندگی رشد چشم گیری داشته، و تلاشهای زیادی در زمینه‌ی تحقیق در دقت اجرا و محاسبه‌ی خطای آنها صورت گرفته است (معظمی و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، برنامه‌ی

^۱ - Remote Sensing
Satellite Rainfall Estimate-^۲

که داده‌های بارش ماهواره‌ی TRMM می‌تواند عملکرد خوبی را برای برآورد جریان در حوضه‌ی آبخیز مذکور داشته باشد. معظمی و همکاران (۲۰۱۳)، در مقایسه‌ی سه الگوریتم تخمین بارش ماهواره‌ی PERSIANN، TMAP-3B42RT و TMPA-3B42V7 بارانسنجی در ایران، نتیجه گرفتند که الگوریتم TMPA-3B42V7 با $MBias = -1/47 \text{ mmd}^{-1}$ ، $RMSE = 13/6\%$ و ضریب همبستگی $0/61$ ، تخمین بهتری را از بارش روزانه نسبت به دو الگوریتم دیگر داشته است. غضنفری مقدم و همکاران (۱۳۹۰)، داده‌های بارش روزانه‌ی الگوریتم PERSIANN و داده‌های به دست آمده از روش‌های گوناگون درون‌یابی، را با استفاده از داده‌های ایستگاههای منطقه‌ی شمال خراسان را برای ایستگاه بجنورد با داده‌های دیدبانی شده در ایستگاه مزبور مقایسه کردند. نتایج آنها نشان دادند که ضریب همبستگی داده‌های الگوریتم PERSIANN با داده‌های دیدبانی، بیشتر از ضریب همبستگی داده‌های درون‌یابی و داده‌های دیدبانی است. کتیرایی بروجردی (۱۳۹۲)، برای مقایسه‌ی داده‌های بارش ماهواره‌ی PERSIANN و داده‌های بارانسنجی زمینی با تفکیک زیاد بر فراز ایران طی سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷، به این نتیجه رسید که الگوریتم PERSIANN الگوی تغییرات مکانی بارش سالانه را به خوبی شناخته، ولی مقدار آن را در اغلب نقاط ایران کمتر و در بعضی مناطق خشک کویری بیشتر برآورد می‌کند.

دای و کروک (۲۰۰۳)، پیش‌بینی بدهی جریان رود-ی را در حوضه‌های آفریقای جنوبی با بهره‌وری از شبیه‌سازی IHACRES انجام داده و کارایی شبیه‌سازی مذکور را در پیش-بینی جریان حوضه‌های کوچک، جریانهای با سرعت کم و پیش‌بینی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر بدهی، مناسب ارزیابی کردند. کارکانو و همکاران (۲۰۰۸) طی تحقیقی برای شبیه‌سازی جریان روزانه در مناطق شمالی ایتالیا، دریافتند که وقتی داده‌های ورودی مناسب در دسترسند، عملکرد شبیه‌های ساده مانند IHACRES نسبت به یک شبیه‌های پیچیده بهتر است. کروک و جکمن (۲۰۰۸)

IHACRES نیز برای شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های آبخیز در تحقیقات زیادی به کار رفته است، که به ترتیب در این جا به برخی از آنها اشاره می‌شود.

کالیسکان و همکاران (۲۰۰۸)، داده‌های بارش ماهواره‌ی TRMM را در حوضه‌ی رود تاپاجو، از انشعابهای اصلی رود آمازون، واقع در کشور برزیل مورد ارزیابی قرار دادند. آنها مقادیر بارندگی روزانه‌ی ماهواره‌ی TRMM و داده‌های زمینی باران سنجه‌ها را به عنوان ورودی شبیه‌آشناسی MGB-IPH مورد استفاده قرار داده و آب‌نگار-های حاصل از محاسبات را با آب‌نگارهای مشاهداتی مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که از داده‌های ماهواره‌ی TRMM-3B42 را می‌توان به عنوان ورودی به شبیه‌های توزیعی بارش-رواناب در حوضه‌های گرمسیری جنوب آمریکا بهره برد. استیسن و سندهلوت (۲۰۱۰) پنج محصول ماهواره‌ای، از جمله PERSIANN، CMORPH و TRMM-3B42 را در حوضه‌ی آبخیز رود سنغال به عنوان ورودی شبیه‌آشناسی MIKE SHE مورد ارزیابی قرار داده و متوجه شدند که عملکرد TRMM-3B42 بهتر از دیگر محصولات ماهواره‌ای است. بهرنگی و همکاران (۲۰۱۱)، کارایی و سودمندی استفاده از محصولات بارش ماهواره‌ی ای^۱ (SPPs) را برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاس حوضه آبخیز ارزیابی کردند. برای این منظور، پنج محصول بارش الگوریتم ماهواره‌ی ای TMPA-V6، TMPA-RT، CMORPH، PERSIANN-adj و PERSIANN را به عنوان متغیرهای ورودی به شبیه‌آشناسی SAC-SMA برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاسهای زمانی ۶ ساعته و ماهانه استفاده کردند. نتایج برای هر پنج نوع محصول شدتهای متفاوت بارندگی و در فصول مختلف سال با هم مقایسه گردیده و توانایی هر الگوریتم در به دست آوردن رواناب با توجه به خطاها و عدم قطعیت‌های آن الگوریتم نشان داده شد. لی و همکاران (۲۰۱۲) داده‌های بارش ماهواره‌ی TRMM را با داده‌های باران سنجه‌ها در مقیاسهای زمانی مختلف مقایسه، و کارایی داده‌های TRMM را برای شبیه‌سازی فرایندهای آشناسی رود یانگتس در حوضه‌ی آبخیز زنجینگ در چین را ارزیابی کردند. شبیه‌سازی فرایندهای آشناسی ماهانه نشان داد

^۲ - Multiplicative Bias^۳ - Relative Bias^۱ Satellite-based Precipitation Products

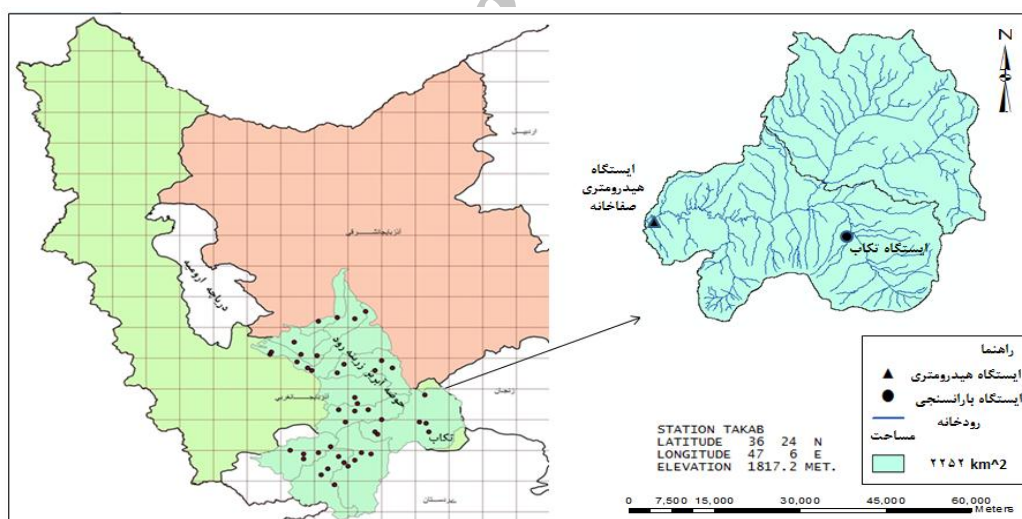
مشاهداتی بوده است. اگر چه شبیه نتوانسته اند بده‌های حداکثر را به خوبی برآورد کند، اما در مجموع با توجه به کم آن و شبیه‌سازی خوب با ضریب تعیین ۰/۶۶ در مرحله‌ی واسنجی و ۰/۶۱ در مرحله‌ی ارزیابی، عملکرد شبیه در حوضه‌ی مورد مطالعه رضایت بخش بوده است.

مواد و روشها

منطقه مطالعاتی

حوضه‌ی آبخیز زرينه رود با مساحت حدود ۱۳۸۹۰ کیلومتر مربع، در شمال غربی ایران و در جنوب شرقی دریاچه ارومیه‌ی با مختصات جغرافیایی ۴۵° - ۴۵° تا ۱۵° - ۴۷° طول شرقی و ۳۰° - ۳۵° تا ۴۵° - ۳۶° عرض شمالی گسترده است. در این تحقیق، زیرحوضه‌ی رود ساروق چای با مساحت ۲۲۵۲ کیلومتر مربع، با توجه به کامل بودن داده‌های ایستگاه بارانسنجی تکاب و ایستگاه آبنسجی صفاخانه انتخاب شد. شکل (۱)، موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه را نمایش می دهد.

قابلیت اجرای شبیه IHACRES را برای چهار حوضه‌ی آبخیز در استرالیا، با دامنه‌ی مساحتی از ۱۸۱ تا ۲۵۴۰ کیلومتر مربع نمایش دادند. بطور کلی بر حسب معیار نش - ساتکلیف عملکرد شبیه مناسب نشان داده شد. زارعی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از شبیه IHACRES جریان حوضه‌ی آبخیز رود کسلیان را در استان مازندران شبیه سازی کرده، و نتیجه گرفتند که توانایی شبیه در برآورد بده‌های ماهانه از بده‌های روزانه بیشتر بوده، و قابلیت شبیه سازی بده‌های سالانه را نداشته است. آشفته و مساح بوانی (۱۳۸۹) در بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر بده‌های حداکثر در حوضه‌ی آبخیز آیدوغموش آذربایجان شرقی از شبیه IHACRES در بخش شبیه سازی جریان استفاده نموده و نتایج شبیه را برای دوره‌های واسنجی و اعتبار سنجی، به ترتیب با مقادیر ضریب همبستگی ۰/۷۹ و ۰/۷۰ قابل قبول ارزیابی کردند. دوستی و همکاران (۱۳۹۳) برای شبیه سازی جریان روزانه‌ی حوضه‌ی آبخیز تمر از شبیه IHACRES استفاده کردند، نتایج نشان دادند که جریان شبیه سازی شده با کاربرد شبیه کمتر از جریان

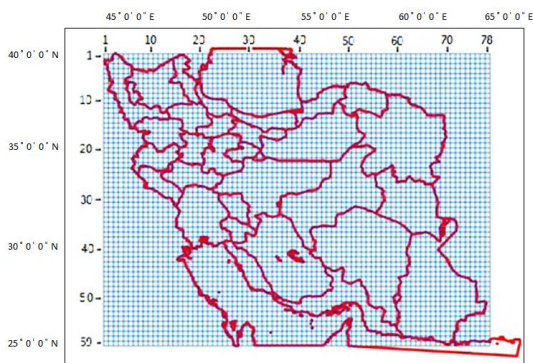


شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه و زیر حوضه‌ی انتخابی.

داده‌ها

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی جریان از داده‌های زمینی روزانه‌ی بارش بر حسب میلی‌متر، دمای میانگین حوضه بر حسب درجه‌ی سانتیگراد و بده بر حسب متر مکعب بر ثانیه در فاصله‌ی سالهای ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۸ میلادی به مدت ۲۰ سال آبی استفاده شد، که ۱۵ سال ابتدایی به تعداد ۵۴۷۸ داده از تاریخ ۲۳/۹/۱۹۸۸ تا ۲۲/۹/۲۰۰۳ برای واسنجی شبیه و ۵ سال دیگر به تعداد ۱۸۲۶ داده از تاریخ ۲۳/۹/۲۰۰۳ تا ۲۱/۹/۲۰۰۸ برای صحت‌سنجی آن در نظر گرفته شدند. همچنین جهت استخراج داده‌های بارش روزانه محصولات الگوریتم‌های ماهواره‌ی PERSIANN^۱، TMPA-3B42^۲ و CMORPH^۳، که دارای دقت زمانی ۳ ساعته و دقت مکانی ۰/۲۵ درجه (برای هر پیکسل مربعی ۲۵×۲۵ کیلومتر مربع یک مقدار) و به صورت سراسری در فاصله‌ی ۵۰ درجه‌ی جنوبی تا ۵۰ درجه‌ی شمالی عرض جغرافیایی از سال ۲۰۰۳ به بعد در دسترسند، و به دلیل آن که مقیاس مکانی داده‌های ماهواره‌ی ای به‌گونه‌ی پیکسل مربعی با اندازه‌ی هر ضلع ۰/۲۵ درجه یا به عبارتی ۲۵ کیلومتر می‌باشد، بنابراین در هر پیکسل یک مقدار برای بارش با کاربرد هر یک از الگوریتم‌های ماهواره‌ی ای به دست می‌آید. شکل اولیه این داده‌ها به صورت پرونده‌های تصویری^۴ می‌باشند، که با نوشتن یک شاخص در محیط نرم افزار Matlab به پرونده‌هایی با شکل اکسلی تبدیل شدند. نقشه‌ی ایران (شکل ۲)، از تعداد ۵۹ ردیف و ۷۸ ستون پیکسل‌های ۰/۲۵ درجه تشکیل شده است. ابتدا، برای سادگی کار، داده‌های بارش ۳ ساعته محصولات ماهواره‌ی ای برای این تعداد پیکسل (۵۹×۷۸)، برای کل ایران استخراج گردید و به شکل مورد نیاز (اکسلی) تبدیل شدند. سپس با جمع کردن داده‌های ۳ ساعته، مقدار ۲۴ ساعته (روزانه) بارش، که مدنظر این تحقیق می‌باشد، به دست آمد. مقادیر حاصله به صورت یک جدول اکسلی با

۵۹ ردیف و ۷۸ ستون برای هر روز بطور جداگانه فراهم آمد. هر سلول این جدول حاوی یک عدد است، که مقدار بارش ماهواره‌ی ای را در یک روز برای یک پیکسل ۰/۲۵ درجه‌ی منحصر به فرد با طول و عرض جغرافیایی مشخص نشان می‌دهد؛ بنابراین، در تحقیق حاضر، از داده‌های بارش ماهواره‌ی ای روزانه سه الگوریتم PERSIANN، TMPA-3B42V7 و CMORPH با توجه به محدوده‌ی پیکسل ماهواره‌ی ای، که ایستگاه بارانسنجی در آن قرار دارد، در فاصله‌ی سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ میلادی برای ارزیابی استفاده شد. در شکل (۳) نقشه‌ی ایران پوشیده شده به وسیله‌ی پیکسل‌های ماهواره‌ی ای و ایستگاه‌های بارانسنجی توزیع شده در کل کشور و محدوده‌ی پیکسل ماهواره‌ی ای ایستگاه بارانسنجی منطقه‌ی مطالعاتی نشان داده شده است.



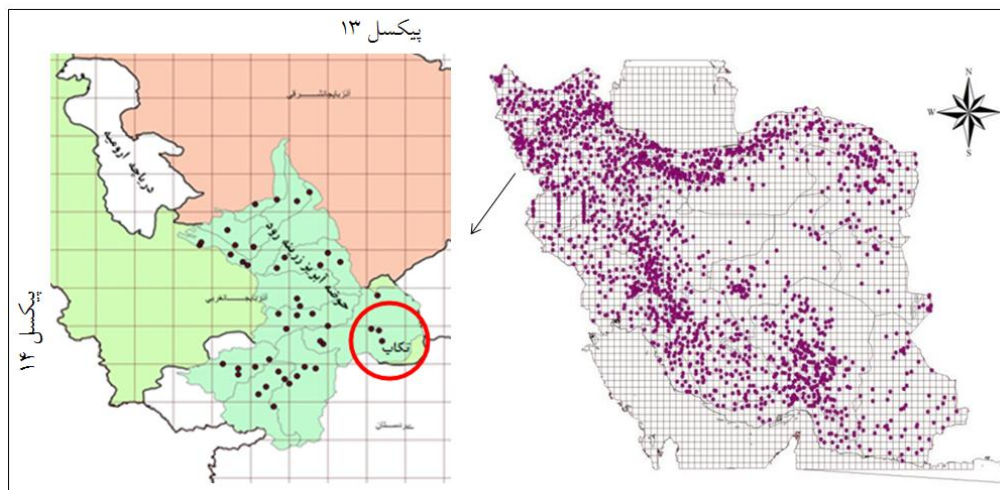
شکل ۲- پیکسل‌های ماهواره‌ی ای تشکیل دهنده‌ی کشور ایران

^۱ - Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using ANN

^۲ - Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multi-satellite Precipitation Analysis

^۳ - Climate Prediction Center (CPC) Morphing Technique

^۴ - Image



شکل ۳- محل کل ایستگاههای بارانسنجی در پیکسل‌های ماهواره ای برای کل ایران و منطقه‌ی مطالعاتی.

(۱۹۹۳)، به گونه ای که بخش غیر خطی به سه فراسنج ضریب تعادل حجم بارش c ، ثابت زمانی خشک شدن حوضه‌ی آبخیز^۵ τ_w و عامل تعدیل دما^۶ f (تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات) و بخش خطی نیز به سه فراسنج ثابت زمانی فروکش کردن جریان گروه τ_q ، ثابت زمانی فروکش کردن جریان آهسته τ_s و حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رود مشارکت دارد V_s وابسته است.

معرفی شبیه IHACRES

شبیه IHACRES^۱ یک شبیه بارش-رواناب پیوسته و مفهومی^۲ - متریک می‌باشد، که به وسیله‌ی جکمن و هورنبرگر (۱۹۹۳)، ارائه شده است. IHACRES یکی از شبیه‌های آشناسی ساده با داده های ورودی کم است که در آن تنها از آمار بارش و دمای میانگین حوضه برای به دست آوردن رواناب موجود استفاده می شود، به گونه ای که این داده‌ها به عنوان متغیرهای ورودی برای شبیه‌سازی جریان و داده‌های مشاهداتی بده در ایستگاههای آبنسجی برای سنجش دقت شبیه IHACRES مورد استفاده قرار می‌گیرند (جکمن و هورنبرگر، ۱۹۹۳). مطابق شکل (۴)، IHACRES از دو میزان غیر خطی کاهش^۳ و میزان خطی آب نگار واحد^۴ تشکیل شده است، بطوری که ابتدا بارش r_k و دمای t_k در هر گام زمانی K به وسیله‌ی میزان غیر خطی، به گونه‌ی بارش موثر u_k درآمده، سپس بارش موثر u_k به وسیله‌ی میزان خطی آب نگار واحد، به رواناب X_k در همان گام زمانی تبدیل می‌گردد. پس این شبیه شامل دو بخش به هم پیوسته غیر خطی و خطی است، که به ترتیب برای محاسبه‌ی تلفات و تبدیل بارش موثر به رواناب تعریف شده است (جکمن و هورنبرگر،

^۱ - Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data

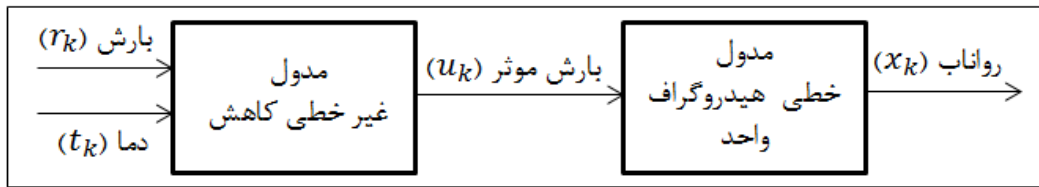
^۲ - Conceptual

^۳ - Non- linear loss module

^۴ - Linear unit hydrograph module

^۵ - Catchment drying time constant

^۶ - Temperature modulation factor



شکل ۴- چگونگی شبیه سازی بارش - رواناب در شبیه IHACRES (جکمن و هورنبرگر، ۱۹۹۳).

نتایج و بحث

در ابتدا شبیه در دوره‌ی انتخاب شده، واسنجی^۵ گردید، که فرایند واسنجی شبیه شامل تخمین فراسنجهایی است که حداقل تابع هدف را مشخص می‌کند. در واسنجی IHACRES مقادیر ثابت زمانی خشک شدن حوضه‌ی آبخیز τ_w و عامل تعدیل دما f در بخش غیر خطی شبیه به صورت دستی به وسیله‌ی کاربر انتخاب گردیده، و مقادیر فراسنج ضریب تعادل حجم بارش c و فراسنجهای بخش روندیابی خطی آن به وسیله‌ی خود نرم‌افزار محاسبه می‌شوند. در این مرحله بهترین شبیه بر اساس مقادیر معیارهای ارزیابی انتخاب می‌گردد.

با اجرای شبیه و انجام واسنجی با کاربرد روش دستی آزمون و خطا با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه آبخیز، فراسنجهای به دست آمده از فرایند واسنجی شبیه در جدول (۱)، ارائه شده‌اند. با توجه به مقادیر جدول (۱)، فراسنج V_s بیانگر مشارکت جریان پایه در ایجاد جریان رود بوده و مقادیر زیاد آن نشان دهنده‌ی وجود جریان پایه‌ی بیشتر در رود است. این دستاورد با نتایج دوستی و همکاران (۱۳۹۳)، زارعی و همکاران (۱۳۸۸) و خیرفام و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد. فراسنج c حجم رطوبت ذخیره شده در حوضه (ضریب تعادل حجم بارش) بر حسب میلیمتر بوده و نشان دهنده‌ی سرعت واکنش حوضه‌ی آبخیز نسبت به بارش می‌باشد. اگر مقدار این فراسنج کمتر باشد، حوضه واکنش آهسته‌تری را نسبت به بارش نشان می‌دهد. از آنجا که مقدار به دست آمده برای عامل مزبور در این حوضه کم است، بنابراین حوضه نسبت به بارش با سرعت کمتری واکنش نشان می‌دهد، که علت آن را می‌توان احتمالاً در وجود پوشش جنگلی در بخشهایی از آن، که باعث تأخیر در تولید جریان می‌شود، دانست. زارعی و همکاران (۱۳۸۸)

معیارهای ارزیابی شبیه

جهت ارزیابی عملکرد IHACRES در شبیه سازی بده، از ضریب همبستگی^۱ (CC) خطی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه سازی شده $-1 < CC < +1$ ، مقدار یک نشان دهنده‌ی تطابق کامل می‌باشد) و شاخص ریشه‌ی میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) که نسبت به شاخص میانگین قدر مطلق خطا^۳ (MAE)، وزن بیشتری به خطاهای بزرگتر می‌دهد و آریبی^۴ (خطای کل در حجم جرم جریان) نسبی (RBias) بهره‌وری گردید، که با روابط (۱) تا (۴) در زیر آورده شده‌اند:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs})_i - \bar{Q}_{obs}] [(Q_{sim})_i - \bar{Q}_{sim}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs})_i - \bar{Q}_{obs}]^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n [(Q_{sim})_i - \bar{Q}_{sim}]^2}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(Q_{obs})_i - (Q_{sim})_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Q_{obs})_i - (Q_{sim})_i]^2} \quad (3)$$

$$RBias = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs})_i - (Q_{sim})_i]}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})_i} \times 100\% \quad (4)$$

که در آنها Q_{obs} و Q_{sim} به ترتیب بده‌ی مشاهداتی و بده‌ی شبیه سازی شده؛ \bar{Q}_{obs} و \bar{Q}_{sim} به ترتیب بده‌ی میانگین مشاهداتی و بده‌ی میانگین شبیه سازی شده بر حسب متر مکعب بر ثانیه و n تعداد داده‌ها می‌باشند.

¹ - Correlation Coefficient

² - Root Mean Square Error

³ - Mean Absolute Error

⁴ - Overall error in flow volume

⁵ - Calibration

در حوضه‌ی آبخیز کسلیان، و لیتلوود و همکاران (۲۰۰۷) یافته‌اند. در کشور برزیل به مقادیر بیشتری از این فراسنج دست

جدول ۱- جزئیات مقادیر فراسنجهای به دست آمده از فرایند واسنجی شبیه IHACRES

مقادیر	فراسنجهای
۴	ثابت زمانی خشک شدن حوضه آبخیز (روز)
۵/۸	عامل تعدیل دما (یک بر درجه سانتیگراد)
۰/۰۰۲۶۸۷	ضریب تعادل حجم بارش (میلیمتر)
۲۳/۴۶۳	ثابت زمانی کاهش پاسخ جریان آهسته حوضه (روز)
۰/۱	آستانه شاخص رطوبت خاک (بدون بعد)
۱	حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد (بدون بعد)

منطقه‌ی مورد مطالعه، به عنوان ورودی شبیه‌سازی واسنجی شده IHACRES، به جای داده‌های بارش ایستگاه بارانسنجی برای شبیه‌سازی جریان روزانه، استفاده گردید، که نتایج آن در شکل (۷) و جدول (۳) آورده شده‌اند. مقادیر جدول (۳)، گویای کارایی بالاتر الگوریتم TRMM-3B42 در شبیه‌سازی رواناب حوضه‌ی مطالعاتی می‌باشند، بطوری که مقادیر شاخصهای خطا در الگوریتم TRMM-3B42 در مقایسه با دو الگوریتم دیگر کمتر بوده که نشان دهنده‌ی خطای کمتر شبیه‌سازی در برآورد بدهی جریان است. همچنین این الگوریتم بیشترین ضریب همبستگی را نسبت به الگوریتم‌های دیگر دارد، که با نتایج تحقیق معظمی و همکاران (۲۰۱۳)، استیسن و سندهلوت (۲۰۱۰) و کالیسکان و همکاران (۲۰۰۸) در خصوص تخمین بهتر TRMM-3B42 از بارش روزانه، همخوانی دارد. افزون بر آن با توجه به نتایج مطالعه‌ی موتوویلو و همکاران (۱۹۹۹) در ارزیابی شبیه IHACRES، الگوریتم PERSIANN نیز عملکردی نسبتاً قابل قبولی را در تخمین بدهی حوضه داشته است. در حالی که نتایج شبیه‌سازی با الگوریتم CMORPH با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی، قابل قبول نبوده و تطابق پایینی بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده وجود دارد، جیانگ و همکاران (۲۰۱۲) نیز به این نتیجه دست یافتند که داده‌های CMORPH نسبت به TMPA دقت کمتری را در تخمین بارش دارد.

در شکل (۵) نمودار پراکندگی بدهی پیش‌بینی شده در مقابل بدهی مشاهداتی رسم شده و نحوه‌ی پراکنش داده‌ها از خط $y = x$ در دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی نشان داده شده است. با توجه به مقادیر ضریب همبستگی و نتایج مطالعه‌ی موتوویلو و همکاران (۱۹۹۹) در ارزیابی IHACRES، نتایج شبیه‌سازی با برنامه‌ی مزبور در این تحقیق قابل قبول می‌باشد.

همچنین، نمودارهای مقادیر جریان روزانه‌ی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده جهت مقایسه‌ی ترسیمی برای واسنجی و صحت‌سنجی^۱ شبیه در شکل (۶) ارائه شده‌اند، که نشان می‌دهند شبیه‌سازی برای دوره‌ی واسنجی در بدهی‌های پایه دارای تطابق بیشتری می‌باشد.

مقادیر ارزیابی کمی نتایج شبیه‌سازی جریان نیز بر اساس روابط (۱) تا (۴)، مطابق جدول (۲) به دست آمدند. با توجه به مقادیر جدول (۲)، ارزیابی نسبی منفی در هر دو دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی مشاهده شده و شبیه‌سازی بدهی محاسباتی را کمتر از رواناب مشاهداتی برآورد کرده است، که احتمالاً یکی از دلایل آن در نظر نگرفتن رواناب ناشی از ذوب برف در منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. دوستی و همکاران (۱۳۹۳) نیز در حوضه‌ی آبخیز تمر و زارعی و همکاران (۱۳۸۸) نیز در حوضه‌ی آبخیز کسلیان به این نتیجه دست یافته بودند.

در ادامه جهت ارزیابی کارایی الگوریتم‌های برآورد بارش مبتنی بر ماهواره‌ها، داده‌های روزانه بارش الگوریتم‌های PERSIANN، TRMM-3B42، و CMORPH در

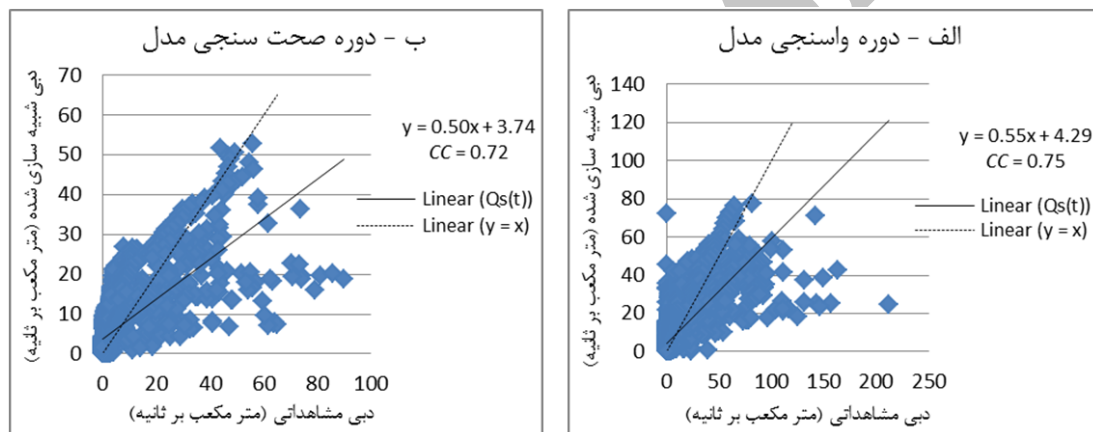
¹ - Validation

جدول ۲- مقادیر معیارهای ارزیابی نتایج شبیه سازی جریان در دوره های واسنجی و صحت سنجی.

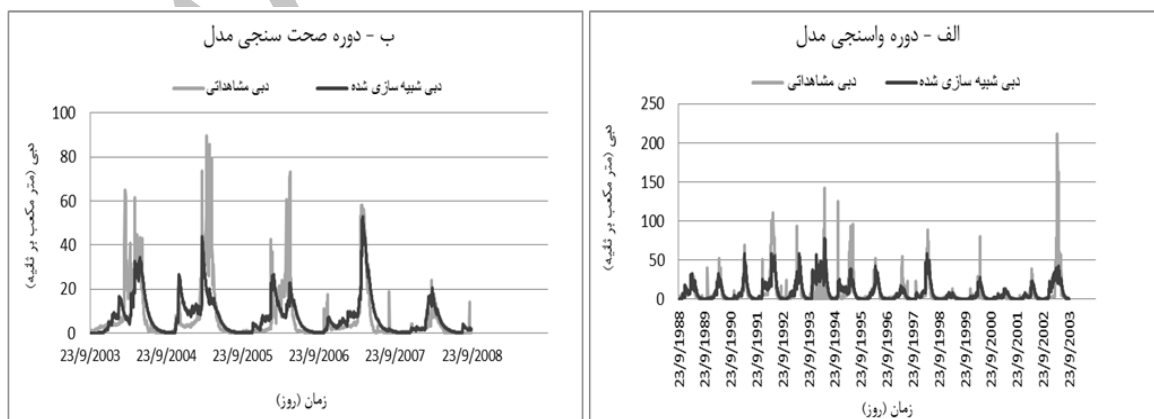
معیارهای ارزیابی نتایج شبیه	دوره‌ی واسنجی	دوره‌ی صحت سنجی
ضریب همبستگی	CC	۰/۷۲
ریشه میانگین مربعات خطا	RMSE	۶/۰۱
میانگین قدر مطلق خطا	MAE	۴/۶۱
اریبی نسبی (%)	RBias	-۴/۳۲٪
تعداد داده ها	n	۵۴۷۸

جدول ۳- نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره ای در شبیه سازی رواناب با کاربرد شبیه IHACRES

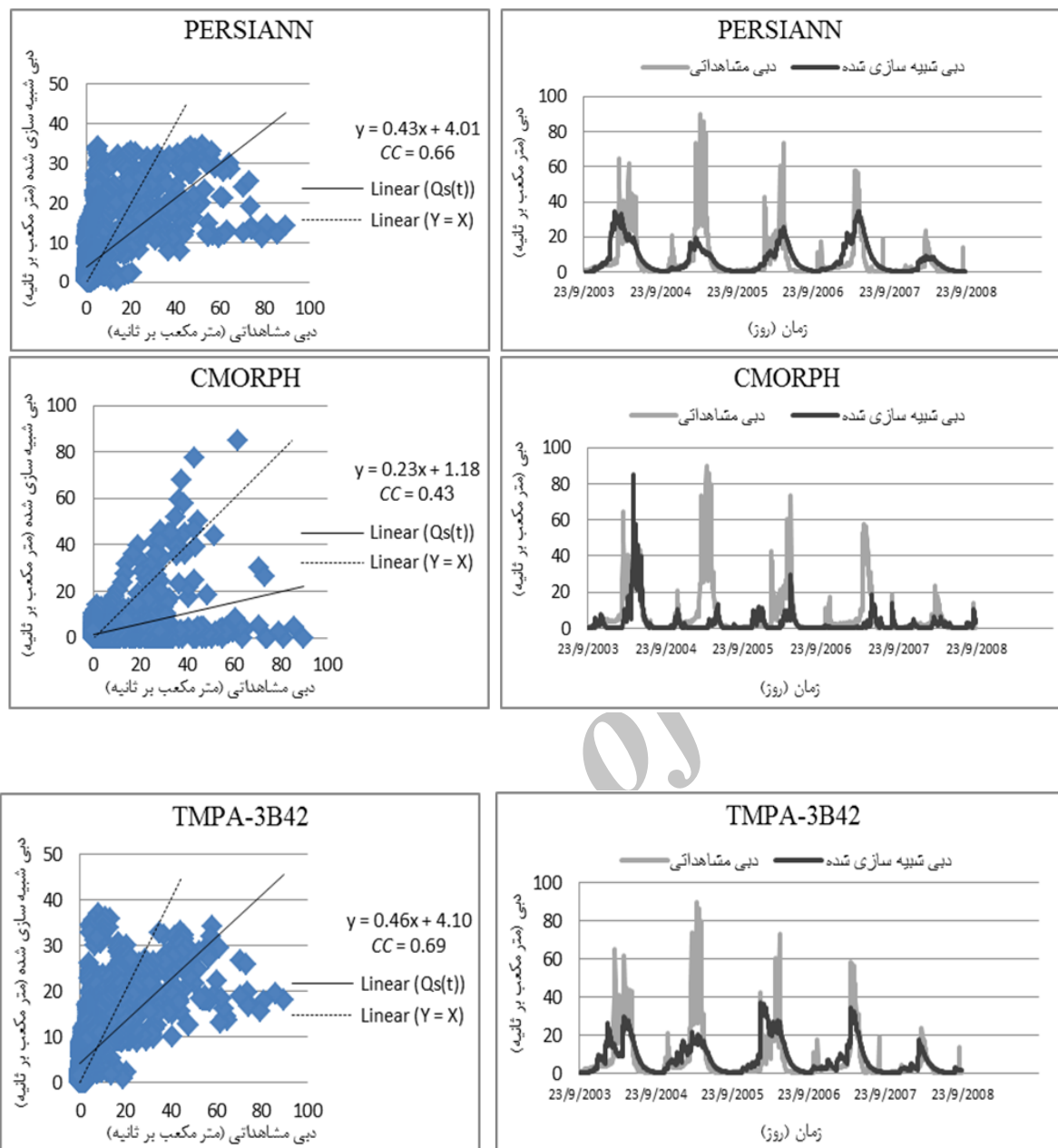
الگوریتم بارش ماهواره ای	معیارهای ارزیابی شبیه			
	CC	RMSE	MAE	RBias (%)
PERSIANN	۰/۶۶	۶/۰۷	۴/۹۲	-۱/۲۲٪
CMORPH	۰/۴۳	۶/۲۴	۵/۵۷	۵۹/۴۴٪
TRMM-3B42	۰/۶۹	۵/۹۳	۴/۷۶	-۵/۳۹٪



شکل ۵- پراکندگی بدهی مشاهداتی و پیش بینی شده با کاربرد شبیه IHACRES (الف) در دوره‌ی واسنجی (ب) در دوره‌ی صحت سنجی.



شکل ۶- مقادیر جریان روزانه‌ی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با کاربرد شبیه IHACRES (الف) در دوره‌ی واسنجی (ب) در دوره‌ی صحت سنجی.



شکل ۷- آب نگارها و نمودارهای پراکنش شبیه سازی جریان با الگوریتم‌های بارش ماهواره ای

نتیجه گیری

که مقادیر کمتری را نسبت به بیشترین بدهای مشاهداتی شبیه سازی کرده است؛ این موضوع با نتایج دای و کروک (۲۰۰۳)، دوستی و همکاران (۱۳۹۳) و آشسته و مساح بوانی (۱۳۸۹) همخوانی دارد. سپس در ارزیابی کارایی و سودمندی الگوریتم‌های بارش ماهواره ای در برآورد رواناب حوضه با شبیه بارش- رواناب IHACRES واسنجی شده، با توجه به معیارهای ارزیابی مشخص گردید که داده‌های الگوریتم TMPA-3B42V7 توانایی بالاتری را در برآورد رواناب نسبت به داده‌های دو الگوریتم دیگر داشته است و

در این تحقیق در ابتدا نتایج شبیه‌سازی جریان با داده های زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت و میزان کارایی IHACRES در برآورد بدهی روزانه مشخص گردید. بر اساس نتایج به دست آمده و با توجه به مطالعه‌ی موتوویلو و همکاران (۱۹۹۹)، می توان گفت که نتایج شبیه سازی با IHACRES در حوضه‌ی مطالعاتی قابل قبول بوده، لکن شبیه در هر دو دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی، توانایی کمتری در پیش بینی بدهای حداکثر دارد، به گونه ای

منابع

۱. آشفته، پ. س. ع. مساح بوانی، ۱۳۸۹. تأثیر تغییر اقلیم بر بده‌های حداکثر (مطالعه موردی: حوضه آیدوغموش آذربایجان شرقی). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۴: ۲۵-۳۹.
۲. بارانی زاده، ا. م. ب. بهیار، س. جوانمرد، و ی. عابدینی، ۱۳۹۰. صحت سنجی برآوردهای بارندگی الگوریتم ماهواره ای PERSIANN باداده‌های بارش زمینی شبکه بندی شده (APHRODITE) در ایران. مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران، فیزیک میان رشته ای. ۲۶۱۵-۲۶۱۸.
۳. خیرفام ح، مصطفی زاده ر، صادقی س ح ر، ۱۳۹۲. تخمین بده روزانه با استفاده از شبیه IHACRES در برخی از حوزه‌های آبخیز استان گلستان. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز سال چهارم. شماره ۷.
۴. دوستی، م. شاهی، ک. حبیب نژاد روشن، م. و م. ح میر یعقوب زاده، ۱۳۹۳. استفاده از شبیه نیمه مفهومی IHACRES در شبیه سازی جریان روزانه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تمر). دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، نشریه پژوهشهای حفاظت آب و خاک. ۲۱: ۲۷۷-۲۹۲.
۵. زارعی، م. قنبرپور، م. ر. حبیب نژاد روشن، م. و ک. شاهی، ۱۳۸۸. شبیه سازی جریان رودخانه با استفاده از شبیه بارش - رواناب IHACRES (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کسلیان). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۳: ۱۱-۲۰.
۶. صادقی س ح ر، یثربی ب، نورمحمدی ف، ۱۳۸۴. تهیه و تحلیل شبیه‌های بارش - رواناب ماهانه حوزه آبخیز هراز در استان مازندران. پژوهشنامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر. ۳(۱): ۱-۱۲.
۷. غضنفری مقدم، م. ص. علیزاده، ا. موسوی بایگی، س. م. فرید حسینی، ع. ر. و م. بنایان اول، ۱۳۸۹. مقایسه شبیه PERSIANN با روشهای درون یابی به منظور کاربرد در تخمین مقادیر بارندگی روزانه (مطالعه موردی: خراسان شمالی). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۵: ۲۰۷-۲۱۵.

بنابراین می‌توان از آن به دلیل پوشش زمانی و مکانی مناسب، به عنوان متغیر اصلی در برآورد رواناب حوضه استفاده کرد. نتایج پژوهشهای لی و همکاران (۲۰۱۲)، استیسن و سندهلوت (۲۰۱۰)، و کالیسکان و همکاران (۲۰۰۸) نیز نشان می‌دهند که داده‌های بارش ماهواره‌ی TRMM عملکرد خوبی برای شبیه‌سازی جریان در حوضه‌های آبخیز مطالعاتی داشته‌اند. همچنین نتایج تحقیق معظمی و همکاران (۲۰۱۳)، گویای تخمین بهتر TRMM-3B42 از بارش روزانه می‌باشد. با توجه به مقادیر ضریب همبستگی، الگوریتم PERSIANN نیز عملکردی نسبتاً قابل قبول در تخمین بده‌ی حوضه داشته‌است، لکن نتایج شبیه‌سازی با الگوریتم CMORPH قابل قبول نبوده، و تطابق کمی بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده وجود دارد؛ جیانگ و همکاران (۲۰۱۲) نیز در مطالعه خود دقت کمتر داده‌های الگوریتم CMORPH را در تخمین بارش نسبت به TMPA بیان کرده‌اند. باید توجه داشت که کاربرد شبیه‌های مختلف بارش-رواناب، در حوضه‌هایی دارای اقلیم متفاوت و مقایسه‌ی عملکرد آنها جهت شبیه‌سازی رواناب می‌تواند در تعیین مناسبترین آنها، تأثیر گذار باشد. همچنین، به کارگیری داده‌های الگوریتم‌های مختلف برآورد بارش ماهواره‌ای به عنوان متغیرهای ورودی شبیه‌های مختلف آبشناسی، برای رواناب حوضه‌های آبخیز کشور، به جای داده‌های بارش ایستگاههای بارانسنجی، و با توجه به نقش کلیدی فراسنج بارش در شبیه‌سازی آبشناسی و در دسترس بودن این داده‌ها برای کل ایران، پیشنهاد می‌شود که طی تحقیقات دیگر مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

از موسسه‌ی تحقیات آب - وزارت نیرو، برای همکاری و ارائه‌ی اطلاعات و داده‌های لازم جهت انجام این تحقیق سپاسگزارم.

17. Jakeman, A. J. and G. M. Hornberger, 1993. how much complexity is warranted in a rainfall runoff model?. *Water Resour. Res.* 29: 2637-2649.
18. Jiang, Sh. L. Ren, Y. Hong, B. Yong, X. Yang, F. Yuan, and M. Ma, 2012. Comprehensive evaluation of multisatellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method. *J. Hydrol.* 452-453:213-225.
19. Li, X. Q. Zhang, and Ch. Xu, 2012. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin. *J. Hydrol.* 426-427:28-38.
20. Li, X. Zhang, Q. and Ch. Xu, 2013. Assessing the performance of satellite based precipitation products and its dependence on topography over Poyang Lake basin. *Theor Appl. Climatol.* 115:713-729.
21. Littlewood, I. G. R. T. Clarke, W. Collischonn, and B. F. W. Croke, 2007. Predicting daily streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environm. Model. Softw.* 22: 1229-1239.
22. Motovilov, Y. G. L. Gottschalk, K. Engeland, and A. Rohde, 1999. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agric. Forest Meteorol.* 98-99: 257-277.
23. Moazami, S. S. Golian, M. R. Kavianpour, and Y. Hong, 2013. Comparison of PERSIANN and V7 TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products with rain gauge data over Iran. *Int. J. Remote Sens.* 34: 8156-8171.
۸. کتیرایی بروجردی، پ. س. ۱۳۹۲. مقایسه داده های بارش ماهانه ماهواره ای و زمینی در شبکه ای با تفکیک زیاد روی ایران. *مجله ژئوفیزیک ایران.* ۴: ۱۴۹-۱۶۰.
۹. نجفی، م. ۱۳۸۷. سیستم‌های هیدرولوژیکی (شبیه-سازی بارندگی - رواناب). جلد ۱، انتشارات دانشگاه تهران.
10. Behrangi A, B. Khakbaz, TC, Jaw. A. AghaKouchak, K. Hsu, and S. Sorooshian, 2011. Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin. *J. Hydrol.* 397:225-237.
11. Beven, K. J. 2001. *Rainfall-runoff modelling: The Primer*, John Wiley and Sons Press, Department of Geography Royal Holloway, University of London Egham, Surrey.
12. Carcano, E. C., P. Bartolini, M. Muselli, and L. Piroddi, 2008. Jordan recurrent neural network versus IHACRES in modelling daily streamflows. *J. Hydrol.* 362: 291- 307.
13. Collischonn, B., W. Collischonn, and C. E. Morelli Tucci, 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *J. Hydrol.* 360: 207-216.
14. Croke, B. F. W. and A. J. Jakeman, 2008. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi-arid regions. P41-48. In *Hydrological modelling in arid and semi-arid areas*. Cambridge University Press Cambridge.
15. Croke, B. F. W., R. A. Letcher, and A. J. Jakeman, 2006. Development of a distributed flow model for underpinning assessment of water allocation options in the Naomi River Basin, Australia. *J. Hydrol.* 319: 51-71
16. Dye, P. J. and Croke, B. F. W. 2003. Evaluation of stream flow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environm. Model. Softw.* 18:705-712.

24. Stisen, S. and I. Sandholt, 2010. Evaluation of remote-sensing-based rainfall products through predictive capability in hydrological runoff modeling. *J. Hydrol. Process.* 24:879–891.

Archive of SID