ارزیابی الگوریتم‌های بارش ماهواره ای در شبیه سازی جریان روزانه‌ی رود ساروق چای با استفاده از شبیه IHACRES

آرمان عبدالهی پور[۱]، صابر معظمی گودرزی[۲*]، محمود ذاکری نیری[۳]

چکیده

با توجه به کمبود ایستگاههای آبسنجی در بیشتر حوضه های آبخیز کشور، توسعه‌ی روشهایی که بتوانند آبدهی را در مقیاس زمانی روزانه براورد کنند، از موارد ضروری است که به بهبود اطلاعات مورد نیاز برای اهداف مدیریتی مرتبط با منابع آب منجر می گردد. این روشها معمولا از بارش به عنوان ورودی شبیه‌های آبشناسی استفاده می کنند. جهت اندازه گیری بارش به عنوان متغیر اصلی در براورد رواناب، می توان از الگوریتم‌های ماهواره ای، 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 می شود؛ بنابراین، در تحقیق حاضر ابتدا شبیه سازی جریان روزانه‌ی رود ساروق چای از حوضه‌ی آبخیز زرینه رود باکاربرد شبیه IHACRES و داده‌های زمینی روزانه‌ی بارش، دما و آبدهی برای سالهای ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۷ انجام شد، و شبیه در دو دوره واسنجی و صحت سنجی گردید. سپس جهت ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بارش ماهواره ای در شبیه سازی بده، که هدف این تحقیق است، داده‌های ماهواره ای روزانه‌ی سه الگوریتم PERSIANN، TMPA-3B42V7 و CMORPH در فاصله‌ی سالهای ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۷ به عنوان ورودی شبیه 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 شبیه سازی رواناب حوضه نسبت به دو الگوریتم دیگر می-باشد.

واژه‌های کلیدی: شبیه سازی، جریان روزانه، الگوریتم‌های بارش ماهواره ای، 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 آبسنجی 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 آبشناسی 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 آبشناسی 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 براورد نسبتا دقیق و قابل اطمینان بارش، به عنوان متغیر اصلی شبیه‌های آبشناسی، 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[1] 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 براورد بارش در سطح جهانی، محصولات به دست آمده از الگوریتم‌های براورد بارش ماهواره‌ای[2] (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 آبشناسی می باشد. از این رو، براوردهای 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، براورد 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 آبشناسی، 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 بده-ی 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 براورد 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

[1] - Remote Sensing
[2] - Satellite Rainfall Estimate

IHACRES نیز برای شبیه سازی رواناب حوضه‌های آبخیز در تحقیقات زیادی به کار رفته است، که به ترتیب در این جا به برخی از آنها اشاره می شود.

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 سنجها را به عنوان ورودی شبیه آبشناسی MGB-IPH مورد استفاده قرار داده و آب نگار-های حاصل از محاسبات را با آب نگارهای 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 سندهولت (۲۰۱۰) پنج محصول ماهواره ای، از جمله PERSIANN، CMORPH و TRMM-3B42 را در حوضه‌ی آبخیز رود سنگال به عنوان ورودی شبیه آبشناسی 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 ماهواره ای[۱] (SPPs) را برای شبیه سازی رواناب در مقیاس حوضه آبخیز ارزیابی کردند. برای این منظور، پنج محصول بارش الگوریتم ماهواره ای TMPA-RT، TMPA-V6، CMORPH، PERSIANN و PERSIANN-adj را به عنوان متغیرهای ورودی به شبیه آبشناسی SAC-SMA برای شبیه‌سازی رواناب در مقیاسهای زمانی ۶ ساعته و ماهانه استفاده کردند. نتایج برای هر پنج نوع محصول در 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 سنجها در مقیاسهای زمانی مختلف مقایسه، و کارایی داده‌های TRMM را برای شبیه سازی فرایندهای آبشناسی رود یانگتز در حوضه‌ی آبخیز زنجینگ در چین را ارزیابی کردند. شبیه‌سازی فرآیندهای آبشناسی ماهانه نشان داد که داده‌های بارش ماهواره‌ی TRMM می تواند عملکرد خوبی را برای برآورد جریان در حوضه‌ی آبخیز مذکور داشته باشد. معظمی و همکاران (۲۰۱۳)، در مقایسه‌ی سه الگوریتم تخمین بارش ماهواره ای PERSIANN، TMPA-3B42V7 و TMAP-3B42RT با داده‌های بارانسنجی در ایران، نتیجه گرفتند که الگوریتم TMPA-3B42V7 با $MBias = -۱/۴۷ \ mmd^{-1}$ = -۱۳/۶٪، [۲] $RBias$ = -۱۳/۶٪، [۳] $RMSE = ۶/۵ \ mmd^{-1}$، $MAE = ۴/۵ \ mmd^{-1}$ و ضریب همبستگی ۰/۶۱، 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 داده-های 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 درون یابی و داده‌های دیدبانی است. کتیرایی بروجردی (۱۳۹۲)، برای مقایسه‌ی داده‌های بارش ماهواره‌ای 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 براورد می‌کند.

دای و کروک (۲۰۰۳)، پیش بینی بده‌ی جریان رود-ی را در حوضه‌های آفریقای جنوبی با بهره‌وری از شبیه IHACRES انجام داده و کارایی شبیه مذکور را در پیش-بینی جریان حوضه‌های کوچک، جریانهایی با سرعت کم و پیش بینی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر بده، 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)

۱- Satellite-based Precipitation Products

۲ - Multiplicative Bias

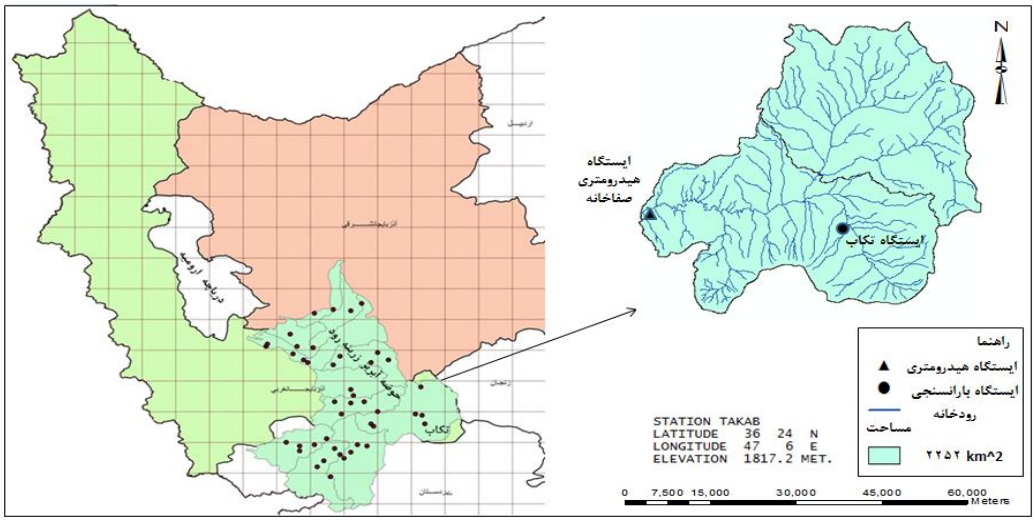
۳ - Relative Bias

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 کسیلیان را در استان مازندران شبیه-سازی کرده، و نتیجه گرفتند که توانایی شبیه در براورد 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 مشاهداتی بوده است. اگر چه شبیه نتوانسته اند بده‌های حداکثر را به خوبی براورد 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

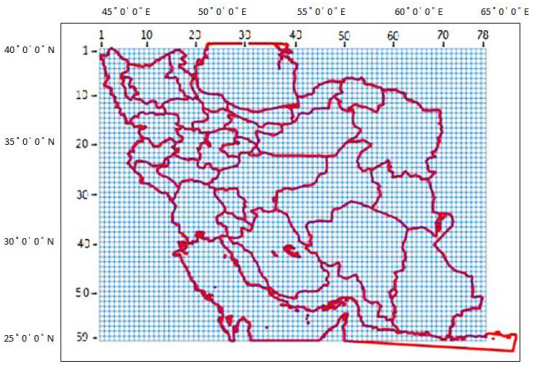
حوضه‌ی آبخیز زرینه رود با مساحت حدود ۱۳۸۹۰ کیلومتر مربع، در شمال غربی ایران و در جنوب شرقی دریاچه ارومیه‌ی با مختصات جغرافیایی ´۴۵ – □ ۴۵ تا ´۱۵-□ ۴۷ طول شرقی و ´۳۰ – □ ۳۵ تا ´۴۵ –□ ۳۶ عرض شمالی گسترده است. در این تحقیق، زیرحوضه‌ی رود ساروق چای با مساحت ۲۲۵۲ کیلومتر مربع، با توجه به کامل بودن داده‌های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



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

داده‌ها

در این تحقیق، برای شبیه سازی جریان از داده های 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 صحت سنجی آن در نظر گرفته شدند. همچنین جهت استخراج داده‌های بارش روزانه محصولات الگوریتم‌های ماهواره ای PERSIANN[1]، TMPA-3B42[2] و CMORPH[3]، 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 به‌دلیل آن که مقیاس مکانی داده‌های ماهواره ای به‌گونه‌ی پیکسل مربعی با اندازه‌ی هر ضلع ۰/۲۵ درجه یا به عبارتی ۲۵ کیلومتر می باشد، بنابراین در هر پیکسل یک مقدار برای بارش باکاربرد هر یک از الگوریتم‌های ماهواره ای به دست می آید. شکل اولیه این داده‌ها به صورت پرونده‌های تصویری[4] می باشند، 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، داده های بارش ۳ ساعته محصولات ماهواره ای برای این تعداد پیکسل (۷۸×۵۹)، 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 می باشد، 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 ماهواره ای را در یک روز برای یک پیکسل ۰/۲۵ درجه‌ی منحصر به فرد با طول و عرض جغرافیایی مشخص نشان می دهد؛ بنابراین، در تحقیق حاضر، از داده های بارش ماهواره ای روزانه سه الگوریتم PERSIANN، TMPA-3B42V7 و CMORPH با توجه به محدوده‌ی پیکسل ماهواره 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 به‌وسیله‌ی پیکسلهای ماهواره ای و ایستگاههای بارانسنجی توزیع شده در کل کشور و محدوده‌ی پیکسل ماهواره ای ایستگاه بارانسنجی منطقه‌ی مطالعاتی نشان داده شده است.



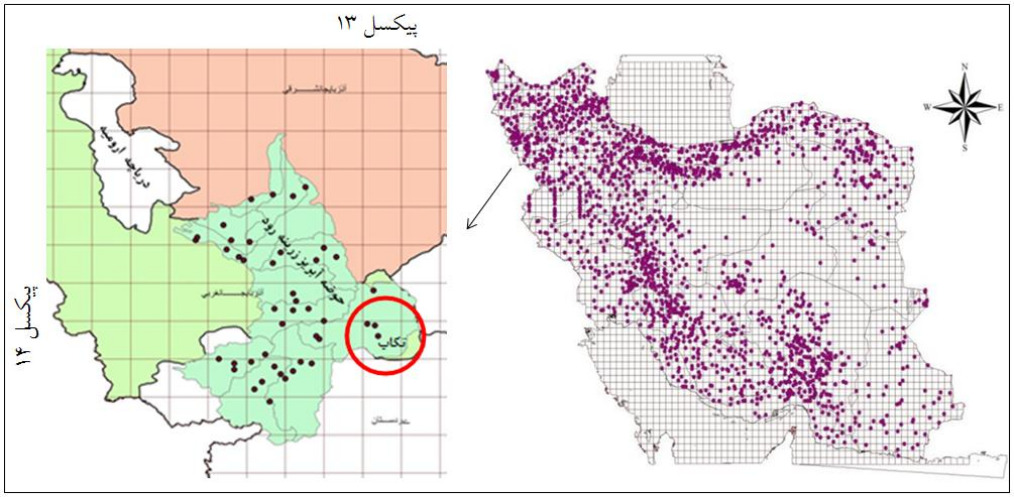
شکل ۲- پیکسلهای ماهواره ای تشکیل دهنده‌ی کشور ایران

[1] - Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using ANN

[2] - Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multi-satellite Precipitation Analysis

[3]- Climate Prediction Center (CPC) Morphing Technique

[4] - Image

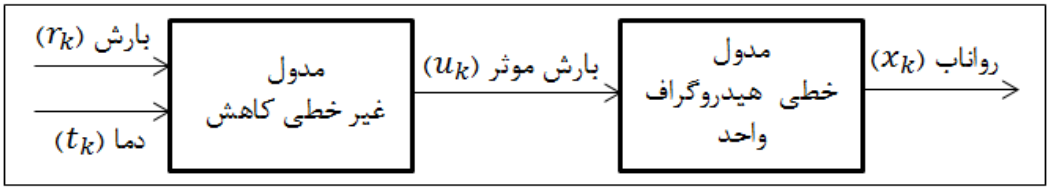


شکل۳- محل کل ایستگاههای بارانسنجی در پیکسلهای ماهواره ای برای کل ایران و منطقه‌ی مطالعاتی.

معرفی شبیه IHACRES

شبیه IHACRES [1] یک شبیه بارش-رواناب پیوسته و مفهومی [2] - متریک می‌باشد، که به‌وسیله‌ی جکمن و هورنبرگر (۱۹۹۳)، ارائه شده است. IHACRES یکی از شبیه‌های آبشناسی 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 داده های مشاهداتی بده در ایستگاههای آبسنجی برای سنجش دقت شبیه IHACRES مورد استفاده قرار می‌گیرند (جکمن و هورنبرگر، ۱۹۹۳). مطابق شکل (۴)، IHACRES از دو میزان غیرخطی کاهش [3] و میزان خطی آب نگار واحد [4] تشکیل شده است، بطوری که ابتدا بارش r_k و دمای t_k در هر گام زمانی K به وسیله‌ی میزان غیرخطی، 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 می گردد. پس این شبیه شامل دو بخش به هم پیوسته غیرخطی و خطی است، که به ترتیب برای محاسبه‌ی تلفات و تبدیل بارش موثر به رواناب تعریف شده است (جکمن و هورنبرگر، ۱۹۹۳)، به گونه ای که بخش غیر خطی به سه فراسنج ضریب تعادل حجم بارش c، ثابت زمانی خشک شدن حوضه‌ی آبخیز [5] τ_w و عامل تعدیل دما [6] f (تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات) و بخش خطی نیز به سه فراسنج ثابت زمانی فروکش کردن جریان گروهی 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.

[1] - Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data
[2] - Conceptual
[3] - Non- linear loss module
[4] - Linear unit hydrograph module
[5] - Catchment drying time constant
[6] - Temperature modulation factor



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

معیار های ارزیابی شبیه

جهت ارزیابی عملکرد IHACRES در شبیه سازی بده، از ضریب همبستگی[1] (CC) خطی بین داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده ($-1 < CC < +1$)، مقدار یک نشان دهنده‌ی تطابق کامل می باشد) و شاخص ریشه‌ی میانگین مربعات خطا[2] ($RMSE$) که نسبت به شاخص میانگین قدر مطلق خطا[3] (MAE)، وزن بیشتری به خطاهای بزرگتر می دهد و اریبی[4] (خطای کل در حجم جریان) نسبی ($RBias$) بهره‌وری گردید، که با روابط (۱۱) تا (۱۴) در زیر آورده شده اند :

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{n}[(Q_{obs})i - \overline{Q}_{obs}][(Q_{sim})i - \overline{Q}_{sim}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}[(Q_{obs})i - \overline{Q}_{obs}]^2}.\sqrt{\sum_{i=1}^{n}[(Q_{sim})i - \overline{Q}_{sim}]^2}} \quad (۱)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|(Q_{obs})i - (Q_{sim})i\right| \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[(Q_{obs})i - (Q_{sim})i\right]^2} \quad (۳)$$

$$RBias = \frac{\sum_{i=1}^{n}[(Q_{obs})i - (Q_{sim})i]}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs})i} \times 100\% \quad (۴)$$

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

[1] - Correlation Coefficient
[2] - Root Mean Square Error
[3] - Mean Absolute Error
[4] - Overall error in flow volume

نتایج و بحث

در ابتدا شبیه در دوره‌ی انتخاب شده، واسنجی[5] گردید، که فرایند واسنجی شبیه شامل تخمین فراسنجهایی است که حداقل تابع هدف را مشخص می-کند. 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 می شوند. در این مرحله بهترین شبیه بر اساس مقادیر معیارهای ارزیابی انتخاب می گردد.

با اجرای شبیه و انجام واسنجی باکاربرد روش دستی آزمون و خطا با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه آبسنجی، فراسنجهای به دست آمده از فرایند واسنجی شبیه در جدول (۱)، ارائه شده اند. 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 دهنده-ی سرعت واکنش حوضه‌ی آبخیز نسبت به بارش می‌باشد. اگر مقدار این فراسنج کمتر باشد، حوضه واکنش آهسته-تری را نسبت به بارش نشان می دهد. 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 می دهد، که علت آن را می توان احتمالا در وجود پوشش جنگلی در بخشهایی از آن، که باعث تأخیر در تولید جریان می شود، دانست. زارعی و همکاران (۱۳۸۸)

[5] - Calibration

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

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

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

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

همچنین، نمودارهای مقادیر جریان روزانه‌ی مشاهداتی و شبیه سازی شده جهت مقایسه‌ی ترسیمی برای واسنجی و صحت سنجی[1] شبیه در شکل (۶) ارائه شده-اند، که نشان می دهند شبیه سازی برای دوره‌ی واسنجی در بده‌های پایه دارای تطابق بیشتری می باشد.

مقادیر ارزیابی کمی نتایج شبیه سازی جریان نیز بر اساس روابط (۱) تا (۴)، مطابق جدول (۲) به دست آمدند. با توجه به مقادیر جدول (۲)، اریبی نسبی منفی در هر دو دوره‌ی واسنجی و صحت سنجی مشاهده شده و شبیه بده‌ی محاسباتی را کمتر از رواناب مشاهداتی براورد کرده است، که احتمالا 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 کسیلیان به این نتیجه دست یافته بودند.

در ادامه جهت ارزیابی کارایی الگوریتم‌های براورد بارش مبتنی بر ماهواره‌ها، داده‌های روزانه بارش الگوریتم‌های PERSIANN، TRMM-3B42.V7 و CMORPH در منطقه‌ی مورد مطالعه، به عنوان ورودی شبیه واسنجی شده IHACRES، به جای داده‌های بارش ایستگاه بارانسنجی برای شبیه سازی جریان روزانه، استفاده گردید، که نتایج آن در شکل (۷) و جدول (۳) آورده شده اند. مقادیر جدول (۳)، گویای کارایی بالاتر الگوریتم TRMM-3B42 در شبیه سازی 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 شبیه در براورد 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 سندهولت (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 نسبتا قابل قبولی را در تخمین بده‌ی حوضه داشته است. در حالی که نتایج شبیه سازی با الگوریتم CMORPH با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی، قابل قبول نبوده و تطابق پایینی بین داده های مشاهداتی و پیش بینی شده وجود دارد، جیانگ و همکاران (۲۰۱۲) نیز به این نتیجه دست یافتند که داده-های CMORPH نسبت به TMPA دقت کمتری را در تخمین بارش دارد.

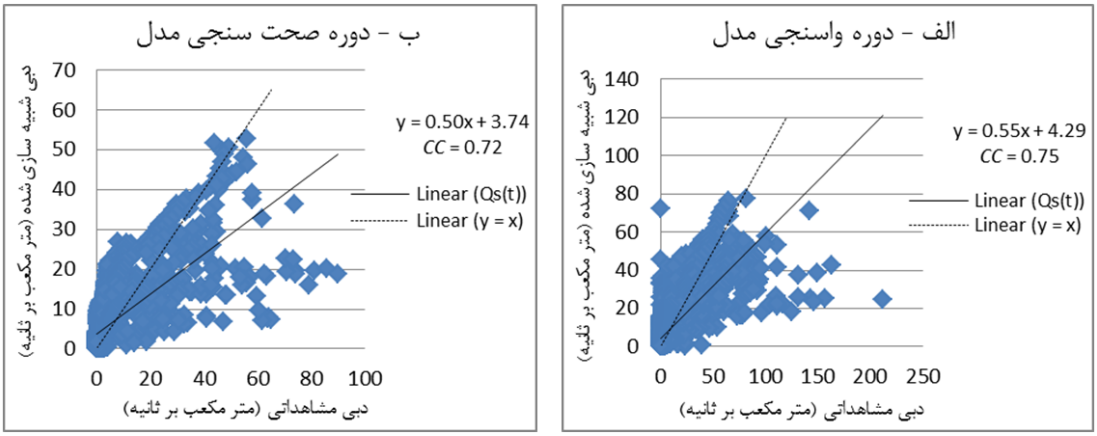
[1] - Validation

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

دوره‌ی صحت سنجی	دوره‌ی واسنجی		معیارهای ارزیابی نتایج شبیه
۰/۷۲	۰/۷۵	*CC*	ضریب همبستگی
۶/۰۱	۷/۸۵	*RMSE*	ریشه میانگین مربعات خطا
۴/۶۱	۵/۰۴	*MAE*	میانگین قدر مطلق خطا
-۴/۳۲٪	-۵/۲۴٪	*RBias*	اریبی نسبی (٪)
۱۸۲۶	۵۴۷۸	*n*	تعداد داده ها

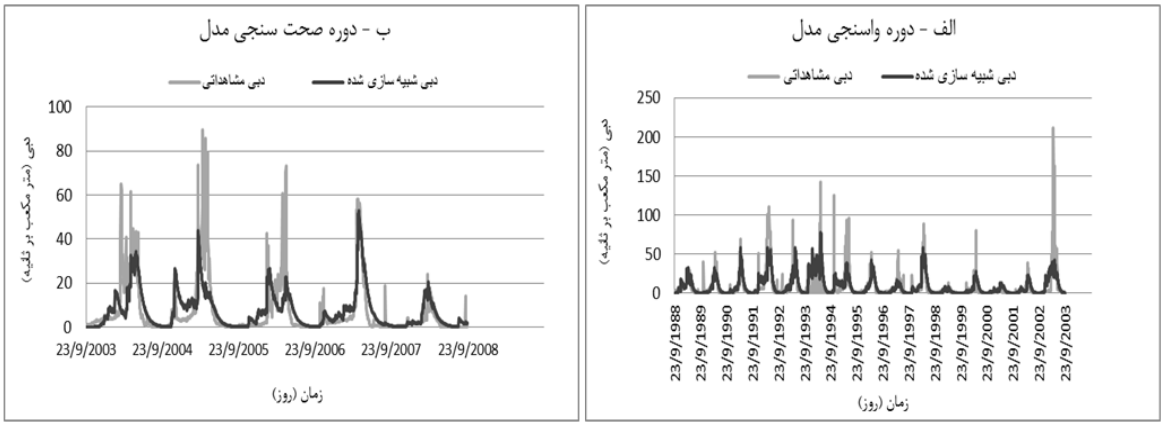
جدول ۳- نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره ای در شبیه سازی رواناب باکاربرد شبیه IHACRES.

الگوریتم بارش ماهواره ای	معیار های 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٪



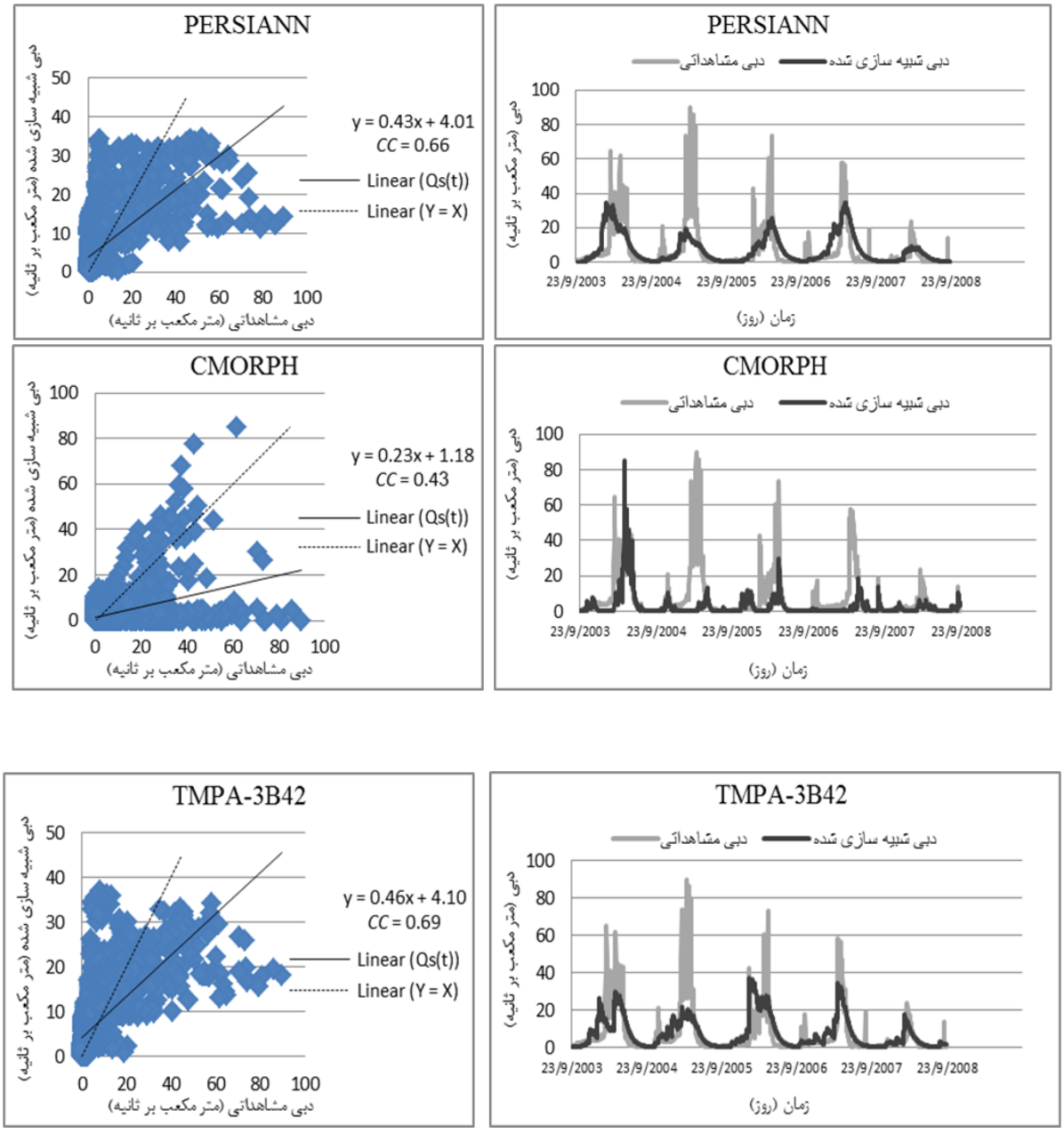
شکل ۵- پراکندگی بده‌ی مشاهداتی و پیش بینی شده باکاربرد شبیه IHACRES

الف) در دوره‌ی واسنجی ب) در دوره‌ی صحت سنجی.



شکل ۶- مقادیر جریان روزانه‌ی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده باکاربرد شبیه IHACRES

الف) در دوره‌ی واسنجی ب) در دوره‌ی صحت سنجی.



شکل۷- آب نگارها و نمودارهای پراکنش شبیه سازی جریان با الگوریتم‌های بارش ماهواره ای

نتیجه گیری

در این تحقیق در ابتدا نتایج شبیه‌سازی جریان با داده های زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت و میزان کارایی IHACRES در براورد 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 بده‌های حداکثر دارد، به گونه ای که مقادیر کمتری را نسبت به بیشترین بده‌های مشاهداتی شبیه سازی کرده است؛ این موضوع با نتایج دای و کروک (۲۰۰۳)، دوستی و همکاران (۱۳۹۳) و آشفته و مساح بوانی (۱۳۸۹) همخوانی دارد. سپس در ارزیابی کارایی و سودمندی الگوریتم‌های بارش ماهواره ای در براورد 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 براورد رواناب نسبت به داده‌های دو الگوریتم دیگر داشته است و

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 سندهولت (۲۰۱۰)، و کالیسکان و همکاران (۲۰۰۸) نیز نشان می دهند که داده های بارش ماهواره‌ی TRMM عملکرد خوبی برای شبیه سازی جریان در حوضه‌های آبخیز مطالعاتی داشته اند. 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 نسبتا قابل قبول در تخمین بده‌ی حوضه داشته است، لکن نتایج شبیه سازی با الگوریتم CMORPH قابل قبول نبوده، و تطابق کمی بین داده‌های مشاهداتی و پیش بینی شده وجود دارد؛ جیانگ و همکاران (۲۰۱۲) نیز در مطالعه خود دقت کمتر داده‌های الگوریتم CMORPH را در تخمین بارش نسبت به TMPA بیان کرده اند. باید توجه داشت که کاربرد شبیه‌های مختلف بارش–رواناب، در حوضه‌هایی دارای اقلیم متفاوت و مقایسه‌ی عملکرد آنها جهت شبیه سازی رواناب می تواند در تعیین مناسبترین آنها، تأثیر گذار باشد. همچنین، به کارگیری داده های الگوریتم‌های مختلف براورد بارش ماهواره ای 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 می شود که طی تحقیقهای دیگر مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

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

منابع

۱. آشفته، پ. س. ع. مساح بوانی، ۱۳۸۹. تأثیر تغییر اقلیم بر بده های 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 باداده های بارش زمینی شبکه بندی شده (APHRODITE) درایران. 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 حوزه های آبخیز استان گلستان. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز سال چهارم. شماره ۷.

۴. دوستی، م. شاهدی، ک. حبیب نژاد روشن، م. و م. ح میر یعقوب زاده. ۱۳۹۳. استفاده از شبیه نیمه مفهومیIHACRES 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 نژادروشن، م. و ک. شاهدی، ۱۳۸۸. شبیه سازی جریان رودخانه با استفاده ار شبیه بارش – رواناب IHACRES (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کسیلیان). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۳ :۱۱-۲۰.

۶. صادقی س ح ر، یثربی ب، نورمحمدی ف، ۱۳۸۴. تهیه و تحلیل شبیه های 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.

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.
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.

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.