

شناخت دقت پایگاه داده ماهواره‌ای بارش PERSIANN-CDR در شبیه‌سازی رواناب مدل SWAT بر روی پهنه حوضه دریاچه مهارلو

محمدرضا عینی - کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
سامان جوادی* - استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
مجید دلاور - استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
محمد دارند - دانشیار گروه آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۱۰

چکیده

همواره دسترسی آسان به داده‌های پایه اقلیمی و قابل اطمینان بودن آن‌ها در نقاط مختلف جهان از چالش‌های اساسی پژوهشگران بوده است. بدین منظور، پایگاه‌های اقلیمی مختلفی نظیر مشاهداتی واکاوی شده و محصولات ماهواره‌ای ایجاد شده‌اند. در این پژوهش از پایگاه داده بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR به منظور برآورد رواناب با مدل نیمه‌توزیعی هیدرولوژیکی SWAT بر روی پهنه حوضه دریاچه مهارلو استفاده شده است. یافته‌های حاصل از این پژوهش نشان داد که ضریب همبستگی مقادیر رواناب برآوردشده حاصل از این پایگاه داده ماهواره‌ای با مقادیر رواناب حاصل از داده‌های مشاهده‌ای ایستگاهی حدود ۰/۶ است. شاخص کارایی نش-ساتکلیف و ضریب تبیین در برآورد رواناب با داده‌های مشاهداتی هر دو به طور متوسط ۰/۶ و با داده‌های ماهواره‌ای به ترتیب ۰/۵ و ۰/۱ به دست آمد. بر پایه یافته‌های این پژوهش، می‌توان گفت که اگرچه مقادیر رواناب برآوردشده از مقادیر بارش پایگاه داده ماهواره‌ای PERSIANN-CDR هماهنگی زمانی بسیار خوبی با داده‌های مشاهده‌ای از خود نشان می‌دهند، از آنجا که این پایگاه داده مقادیر بارش را به طور متوسط ۷۰ میلی‌متر کمتر از مقادیر واقعی مشاهده‌ای نشان می‌دهد، کارایی بالایی در برآورد رواناب بر روی این گستره از ایران زمین از خود نشان نمی‌دهد.

کلیدواژگان: بارش ماهواره‌ای، دریاچه مهارلو، مدل SWAT، هیدرولوژی، PERSIANN-CDR

مقدمه

بارش در کنار تبخیر تعرق می‌تواند بر هیدرولوژی رودخانه و حوضه آبریز تأثیرگذار باشد. برای گسترش فعالیت‌های مدیریت منابع آبی، گستره وسیع و مطمئن از سنج‌های اقلیمی مورد نیاز است. داده‌های اندازه‌گیری‌شده سنتی دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. از مزایای این نوع داده‌ها می‌توان به برآورد مطمئن از بارش در یک محدوده در صورت به‌کارگیری دقت در اندازه‌گیری اشاره کرد. از طرفی، سیستم‌های سنتی اندازه‌گیری بارش به دلایل مختلفی نظیر خطای اندازه‌گیری، هزینه بالا، و صعب‌العبور بودن برخی مناطق قابلیت راه‌اندازی در همه مناطق را ندارند. از همین روی، استفاده از محصولات ماهواره‌ای، راداری، و واکاوی‌شده که به‌راحتی در دسترس‌اند اهمیت خاصی پیدا کرده است (میاو و همکاران، ۲۰۱۵). با وجود این مشکلات و پیشرفت فناوری در دهه‌های اخیر پایگاه‌های جهانی بسیار زیادی برای

ارائه اطلاعات مربوط به بارش در جهان توسعه یافته‌اند؛ این پایگاه‌های اقلیمی به دلیل طول دوره آماری بلندمدت، یاخته‌های شبکه‌بندی‌شده، و ارائه اطلاعات اقلیمی برای همه نقاط دنیا به صورت رایگان و فاقد گپ آماری حائز اهمیت‌اند. از میان این پایگاه‌ها محصولات ماهواره‌ای نظیر PERSIANN-CDR^۱، TRMM^۲، و پایگاه‌های واکاوی‌شده نظیر CRU^۳ و NCEP CFSR^۴ دقت و توانایی بسیار زیادی را در برآورد بارش نشان داده‌اند (کیان و همکاران، ۲۰۱۶؛ عینی و همکاران، ۱۳۹۷). ارزیابی این پایگاه‌ها به منظور دقت برآورد بارش آن‌ها در ابعاد مختلفی قابل اجراست. مثلاً، علاوه بر مقایسه آماری این پایگاه‌ها با داده‌های مشاهداتی، می‌توان به بررسی عملکرد این پایگاه‌ها برای برآورد رواناب اشاره کرد.

کتیرایی بروجردی (۱۳۹۲) به مقایسه داده‌های بارش ماهانه ماهواره‌ای به‌دست‌آمده از روش PERSIANN و داده‌های زمینی در شبکه‌ای با تفکیک زیاد در ایران پرداخته است. مقایسه نقشه میانگین بارش سالانه این دو شبکه روی ایران نشان داد که PERSIANN الگوی تغییرات مکانی بارش سالانه را به‌خوبی می‌شناسد؛ ولی مقدار آن را در اغلب نقاط ایران کم‌برآورد و در بعضی مناطق خشک کویری بیش‌برآورد می‌کند. ضریب همبستگی و پراکنش بارش ماهانه PERSIANN و باران‌سنجی برای همه سلول‌های شبکه نشان‌دهنده کم‌برآورد شدن بارش ماهانه این محصول ماهواره‌ای است. نمودار سری زمانی بارش در مناطق جغرافیایی و اقلیم‌های متفاوت نیز نشان داد که PERSIANN بارش را در منطقه زاگرس کم و در کرانه دریای خزر به‌شدت کم و همچنین سلول واقع در منطقه خشک شرق را زیاد برآورد می‌کند. مسعودیان و همکاران (۱۳۹۳) با مقایسه پایگاه بارش ملی اسفزاری با پایگاه‌های جهانی GPCC^۵، CMAP، و GPCP در سرتاسر ایران مشخص کردند که همبستگی زیادی بین این پایگاه‌ها در ماه‌های پربارش وجود دارد. در پژوهش حاجی‌حسینی و همکاران (۱۳۹۳) مشخص شد که می‌توان در حوضه‌های مرزی و فرامرزی کشور، که ایستگاه‌های مشاهداتی با تراکم کم موجود است، به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی به پایگاه داده CRU اعتماد کرد. در خصوص ارزیابی پایگاه‌های واکاوی‌شده و محصولات ماهواره‌ای می‌توان به پژوهش نیکولوپولوس و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد؛ آن‌ها به بررسی سه محصول TRMM3B42، CMORPH، و PERSIANN برای بررسی یک رویداد سیلابی در حوضه‌ای در ایتالیا پرداختند؛ گفتنی است هر سه محصول در آن منطقه دقت مشابهی از خود نشان دادند. در پژوهش فوکا و همکاران (۲۰۱۴) مشخص شد داده‌های NCEP CFSR در شبیه‌سازی رواناب در مدل SWAT بهتر از شبکه داده‌های مشاهداتی عمل می‌کنند. دیل و سرینیواسان (۲۰۱۴) با بررسی داده‌های NCEP CFSR و مقایسه آن‌ها با شبکه مشاهداتی در مناطق مختلف و وسیعی در حوضه آبریز رود نیل، که شبکه جمع‌آوری مشاهداتی آن‌ها تراکم کمی داشت، به این نتیجه رسیدند که تفاوت چشم‌گیری بین این داده‌ها وجود ندارد. به همین ترتیب، می و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی محصولات ماهواره‌ای TEMPA، CMORPH، و PERSIANN در یک حوضه بزرگ با تأکید بر بررسی بارش‌های بزرگ پرداختند. همین نتیجه را اورباچ و همکاران (۲۰۱۶) در پورتوریکو برای پایگاه NCEP CFSR ثبت کردند. مونتوریو و همکاران (۲۰۱۶) در شبیه‌سازی حوضه‌ای در برزیل به وسیله مدل SWAT به مقایسه و ترکیب محصولات ERA و NCEP SFSR با داده‌های مشاهداتی پرداختند؛ در نتیجه، ترکیب این سه پایگاه توانست به‌خوبی دقت شبیه‌سازی را بهبود ببخشد. به منظور بررسی دقت پایگاه‌های مختلف با داده‌های مشاهداتی، در داخل کشور نیز

1. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks_Climata Data Record
2. Tropical Rainfall Measuring Mission
3. Climatic Research Unit
4. National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis
5. Global Precipitation Climatology Center

محمد دارند و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی عملکرد بارش ماهواره‌ای TMPA بر روی ایران مشخص کردند که این پایگاه داده ماهواره‌ای در غرب ایران و در رشته‌کوه زاگرس بهترین عملکرد و در دوره‌های ترسالی عملکرد بهتری دارد. در مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی و نیمه‌توزیعی همانند SWAT موقعیت مکانی ایستگاه بارش در کنار دقت آن نقش بسزایی در بالاتر رفتن دقت شبیه‌سازی دارد. در مدل SWAT برای هر زیرحوضه تعیین شده نزدیک‌ترین ایستگاه به مرکز ثقل حوضه برای بارش انتخاب می‌شود. در شرایطی که ایستگاه مشاهداتی در فاصله زیاد یا در ارتفاعات قرار داشته باشد عملاً خطای زیادی توسط مقادیر بارش در نتایج شبیه‌سازی زیرحوضه وارد می‌شود. به همین دلایل، استفاده از پایگاه‌های واکاوی‌شده اقلیمی به دلیل نزدیکی یاخته‌ها می‌تواند در بالا رفتن نتایج شبیه‌سازی سودمند ظاهر شود. در حال حاضر، بررسی تفاوت‌های آماری این پایگاه‌ها و نحوه تأثیرگذاری بر خروجی‌های مدل در شبیه‌سازی‌های مختلف هیدرولوژیکی حائز اهمیت است. این پژوهش‌ها در مناطق فاقد داده‌های مشاهداتی یا داده‌های مشاهداتی کم از نظر مکانی و طول دوره زمانی برای تخمین یا تدقیق یا تکمیل داده‌های بلندمدت در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی با مدل SWAT بسیار با اهمیت جلوه کرده‌اند (تیمیگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ کسه و همکاران، ۲۰۱۵).

با توجه به بررسی مطالعات داخلی و خارجی، مشخص شد که از محصول ماهواره‌ای PERSIANN-CDR در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مدل SWAT استفاده نشده است.

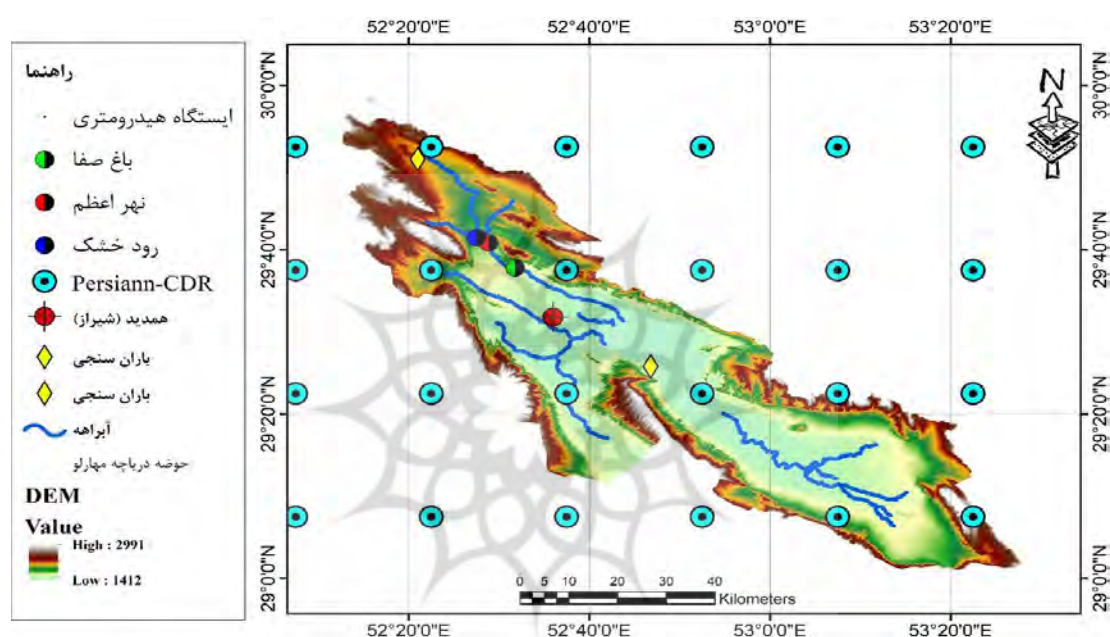
از آنجا که طراحی بسیاری از سازه‌های آبی به اطلاعات پایه منابع آب نیاز دارد، ضروری است داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری با بازه تاریخی بلندمدت در دسترس باشد. بنابراین، باید از پایگاه‌های واکاوی‌شده برای ورودی مدل‌های هیدرولوژی استفاده شود تا خلأ آماری داده‌های پایه در منابع آب کشور برطرف شود. همچنین، هدف از اجرای این پژوهش شناسایی دقت پایگاه بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR در شبیه‌سازی رواناب در صورت فقدان داده مشاهداتی و مقایسه داده‌های بارش شبکه‌بندی‌شده این پایگاه ماهواره‌ای با داده‌های مشاهداتی در یک منطقه نیمه‌خشک در مقیاس روزانه است. در این پژوهش این پایگاه بارش در یک حوضه آبریز منطقه نیمه‌خشک آزمون شده است تا در صورت حصول به نتایج قابل اطمینان، از این پایگاه در سایر مناطق کشور یا در سایر پژوهش‌ها در این منطقه نیز استفاده شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه دریاچه مهارلو است. حوضه دریاچه مهارلو به وسعت ۴۲۷۰ کیلومتر مربع در استان فارس واقع شده است. این محدوده مطالعاتی در حوضه آبریز فلات مرکزی و در تقسیمات حوضه آبریز فرعی دریاچه‌های طشک بختگان و مهارلو قرار دارد. حوضه دریاچه مهارلو بین عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و یک دقیقه تا ۳۰ درجه و ۶ دقیقه شمالی و طول‌های ۵۲ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی واقع شده است. متوسط بارش ثبت‌شده در این منطقه برابر با ۳۶۸ میلی‌متر و دمای متوسط این منطقه ۱۷/۴ درجه سلسیوس ذکر شده است. اقلیم منطقه بر اساس اقلیم‌نمای آمبرژه منطقه نیمه‌خشک معتدل تعیین شد (عینی و همکاران، ۱۳۹۶). در این پژوهش سه ایستگاه مشاهداتی اقلیمی (ایستگاه سینوپتیک شیراز (طول دوره آماری از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۶) و دو ایستگاه باران‌سنجی (طول دوره آماری از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۶) و سه ایستگاه آب‌سنجی چنارسوخته نهر اعظم (۱۹۸۳ تا ۲۰۱۳)، رود خشک (۱۹۸۳ تا ۲۰۱۳)، و باغ صفا (۱۹۸۳ تا ۱۹۹۵) در طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۳ در این منطقه برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل به کار گرفته

شده‌اند. به دلیل فقدان آبراهه دائمی در بخش جنوبی حوضه دریاچه مهارلو در این بخش از حوضه ایستگاه هیدرومتری وجود ندارد و فقط مسیل‌های سیلابی برای زهکشی منطقه وجود دارد. بنابراین، این بخش از حوضه با وجود قرارگرفتن در پیکره‌بندی مدل پارامترهای مدل برای این بخش از حوضه واسنجی نشده است. همچنین، محصولات عمده منطقه نظیر گندم، زیتون، و انگور در این شبیه‌سازی وارد مدل شده‌اند. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های اقلیمی، پایگاه PERSIANN-CDR، و موقعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی در منطقه و شبکه آبراهه‌ای آمده است. در این پژوهش طول دوره آماری مورد استفاده برای ارزیابی دقت مدل‌های واکاوی‌شده اقلیمی از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۱۳ انتخاب شده است. برای مدل‌سازی، از سال ۱۹۸۰ تا سال ۱۹۸۳ برای دوره Warm up، از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۰ برای دوره واسنجی، و از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ برای اعتبارسنجی استفاده شده است.



شکل ۱. محدوده مطالعاتی، توپوگرافی منطقه، شبکه آبراهه، و ایستگاه‌های هم‌دید و PERSIANN-CDR

محصول ماهواره‌ای PERSIANN-CDR و ارزیابی دقت آن

PERSIANN-CDR اطلاعات بارش در مقیاس 0.25×0.25 درجه جغرافیایی در بازه ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی را از سال ۱۹۸۳ در خود جای داده است. این محصول ماهواره‌ای^۱ حاصل یک الگوریتم سنجش از دور با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی است. این محصول ماهواره‌ای در دانشگاه آریزونا توسعه یافته است؛ اطلاعات بیشتر در خصوص این محصول ماهواره‌ای در مرجع کتیرایی بروجردی (۱۳۹۲) ذکر شده است. به منظور برآورد دقت این پایگاه بارش نسبت به داده‌های مشاهداتی، از داده‌های بارش پایگاه مشاهداتی و داده‌های بارش PERSIANN-CDR متوسط‌گیری وزنی (تیسن) انجام شده است. سپس، با هفت شاخص آماری در ماه‌های مختلف دقت پایگاه برآورد شده است. این هفت شاخص عبارت‌اند از: ضریب همبستگی (CC)^۲، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)^۳، خطای

1. <ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/cdr/persiann/files/>

2. correlation coefficient

3. Root mean squared error

میانگین (ME)^۱، شاخص اریبی (BIAS)، احتمال تشخیص (POD)^۲، نرخ هشدار اشتباه (FAR)^۳، و شاخص بحرانی موفقیت (CSI)^۴. CC و ME به ترتیب بیانگر همبستگی خطی و متوسط اختلاف بین پایگاه واکاوی شده و داده‌های مشاهده‌ای اند. RMSE خطای متوسط بین بارش تخمین‌زده شده و مشاهداتی را با در نظر گرفتن وزن بیشتر برای خطاهای زیاد محاسبه می‌کند. BIAS نسبی خطای سیستماتیک داده‌های بارش را محاسبه می‌کند. سه شاخص طبقه‌بندی POD، FAR، و CSI بیانگر تناظر بین بارش رخ داده و تخمین‌زده شده است (کیان ژو و همکاران، ۲۰۱۶). در جدول ۱ رابطه‌های این شاخص‌ها آمده است.

جدول ۱. شاخص‌های آماری مورد استفاده

شماره	شاخص	واحد	رابطه	مقدار بهینه
(۱)	ضریب همبستگی	-	$C = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})(M_i - M_{avg})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - M_{avg})^2}}$	۱
(۲)	ریشه دوم میانگین مربعات خطا	mm	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}}$	صفر
(۳)	خطای میانگین	mm	$CME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2$	صفر
(۴)	شاخص اریبی	%	$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{N} \times 100$	صفر
(۵)	احتمال تشخیص	-	$POD = \frac{H}{H + M}$	۱
(۶)	نرخ هشدار اشتباه	-	$FAR = \frac{F}{H + F}$	صفر
(۷)	شاخص بحرانی موفقیت	-	$CSI = \frac{H}{H + F + M}$	۱

در روابط بالا i بیانگر روز، N فراوانی داده‌ها، O_i مقادیر بارش مربوط به داده‌های مشاهده‌ای، M_i مقادیر بارش مربوط به داده‌های پایگاه واکاوی شده، O_{avg} متوسط بارش داده‌های مشاهده‌ای، و M_{avg} متوسط بارش داده‌های پایگاه‌های واکاوی شده، و H فراوانی روزهای همراه با بارش که توسط هر دو پایگاه ثبت شده است، M فراوانی روزهای همراه با بارش است که مشاهده شده؛ ولی پایگاه داده PERSIANN-CDR ثبت نکرده و F فراوانی روزهای بارشی است که پایگاه داده PERSIANN-CDR ثبت کرده است، ولی بر روی ایستگاه بارش مشاهده نشده است، می‌باشند.

مدل هیدرولوژیکی SWAT

مدل SWAT با توجه به گستردگی معادلات حاکم بر آن یکی از قوی‌ترین و پیچیده‌ترین مدل‌های هیدرولوژیکی به‌شمار می‌آید. در عین حال، این مدل با توجه به اجرای پروژه‌های متعدد در سطح بین‌المللی نشان داده است از دقت بسیار زیادی برخوردار است. مدل SWAT از سال ۱۹۹۸ تا سال ۲۰۱۲ در اداره تحقیقات کشاورزی امریکا (USDA)

1. mean error
2. probability of detection
3. false alarm ratio
4. critical success index

(ARS) توسعه یافته است (نیتشه و همکاران، ۲۰۱۱). این مدل بر پایه و اساس فیزیکی، نیمه‌توزیعی، در مقیاس حوضه، برای زمان پیوسته و با تأکید بر فرایندهای سطح خاک توسعه یافته است. با استفاده از رابطه ۸ بیلان آب‌های سطحی توسط SWAT محاسبه می‌شود. در این رابطه SW_t میزان آب باقی‌مانده در خاک، SW_o میزان اولیه رطوبت خاک، t زمان برحسب روز، R_{day} بارش روزانه برای روز t ام، Q_{surf} مجموع رواناب روزانه برای روز t ام، E_a تبخیر تعرق حاصل از روش پنمن ماتیس، W_{seep} نفوذ آب از پروفیل زیرین خاک برای روز t ام، Q_{gw} جریان آب بازگشتی برای روز t ام (مونتوریو و همکاران، ۲۰۱۶).

$$W_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (8)$$

بیکره مدل SWAT با استفاده از نقشه‌های رقومی ارتفاعی، خاک، و کاربری اراضی در حوضه یادشده انجام شد. بر این اساس، منطقه مورد مطالعه به ۲۲ زیرحوضه و ۱۵۳ واحد همگن هیدرولوژیکی تفکیک شد و اطلاعات اقلیمی و مدیریتی مناطق کشاورزی به مدل معرفی گردید.

برای ارزیابی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2) و کارایی نش-ساتکلیف (NS) در کنار R-factor و P-factor استفاده می‌شود. کیفیت برازش با تعیین درصد مربوط به متغیرهای مشاهده‌شده که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار می‌گیرند (P-factor) و همچنین متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین (R-factor) تعیین می‌شود. رابطه‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب بیانگر ضریب تبیین و کارایی نش می‌باشند که اجزای این رابطه‌ها همانند روابط ۱ تا ۷ است (مونتوریو و همکاران، ۲۰۱۶).

$$SR^r = \left[\frac{\sum_1^N (O_i - O_{avg})(M_i - M_{avg})}{\sqrt{\sum_1^N (O_i - O_{avg})^r} \sqrt{\sum_1^N (M_i - M_{avg})^r}} \right]^r \quad (9)$$

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_1^N (O_i - M_i)^r}{\sum_1^N (O_i - O_{avg})^r} \right]^r \quad (10)$$

یافته‌های پژوهش

ارزیابی دقت داده‌های بارش پایگاه PERSIANN-CDR

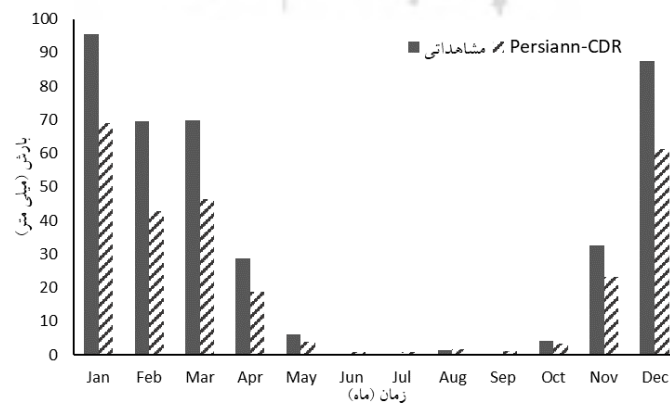
به منظور ارزیابی دقت داده‌های بارش، روش‌های متنوعی مانند مقایسه سلول به سلول، مقایسه نزدیک‌ترین ایستگاه مشاهداتی به مرکز سلول، و روش متوسط‌گیری وزنی وجود دارد. در این پژوهش، پس از متوسط‌گیری وزنی با روش تبسن، از داده‌های بارش مشاهداتی و PERSIANN-CDR، داده‌های روزانه هر ماه با یکدیگر مقایسه شد. نتایج شاخص‌های آماری در جدول ۲ آمده است. ضریب همبستگی داده‌ها نشان داد که این پایگاه در ماه‌های آگوست و سپتامبر بدترین همبستگی را دارد. ریشه دوم میانگین مربعات خطا در ماه ژانویه و فوریه و سایر ماه‌های پربارش منطقه (دسامبر تا آوریل) خطای بیشتری را نشان می‌دهد. خطای میانگین (ME) همانند RMSE در ماه‌های پربارش (دسامبر تا آوریل) نشان داده است که این پایگاه خطای بیشتری را نسبت به سایر ماه‌ها دارد. مقادیر درصد آریبی مثبت برآورد بیشتر بارش به وسیله PERSIANN-CDR و مقادیر منفی کم‌برآورد را نشان می‌دهند؛ در حالت کلی، مقادیر درصد آریبی بیانگر کمتر برآورد کردن بارش به وسیله این پایگاه است. شاخص‌های طبقه‌بندی نشان دادند که احتمال تشخیص

بارش (POD) در فصول کم‌بارش (می تا نوامبر) این پایگاه قدرت تخمین کمتری دارد. نرخ هشدار اشتباه (FAR) نشان داده است که این پایگاه در تشخیص بارش دقت کمی در همه ماه‌ها دارد و به طور متوسط این پایگاه ۵۰ درصد خطا در ثبت و تشخیص داشته است. در نهایت، مقادیر شاخص بحرانی موفقیت (CSI) نیز دقت بالایی را از خود نشان نداده است. مقادیر بهینه هریک از این پارامترها در جدول ۱ آمده است.

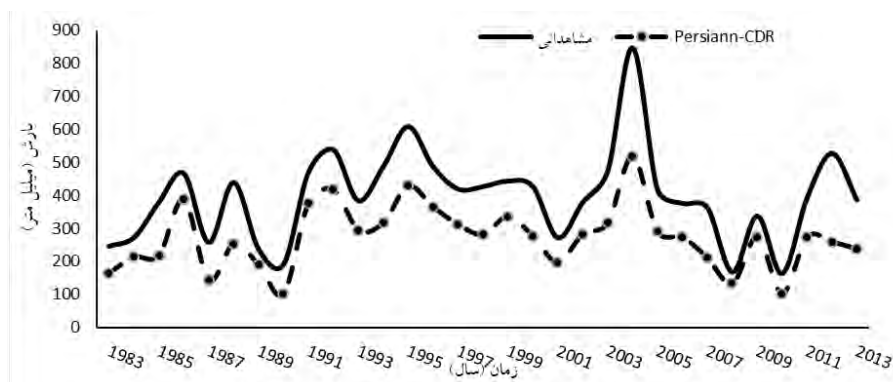
در شکل ۳ مقادیر ماهانه بارش هر دو پایگاه اقلیمی با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است، در همه ماه‌ها، در طول ۳۱ سال، متوسط بارش کم‌برآورد شده است. مجموع بارش سالیانه در طول ۳۱ سال در شکل ۴ به نمایش درآمده است. PERSIANN-CDR در همه سال‌ها کمتر از مقدار مشاهداتی بارش را برآورد کرده است. برای محاسبه همگن و مقایسه پایگاه PERSIANN-CDR با مشاهداتی در حوضه آبریز دریاچه مهارلو از متوسط وزنی (تیسن) استفاده شده است. بنابراین، می‌توان این نتیجه را به حوضه آبریز نسبت داد. این روش محاسبه به دلیل مساحت کم حوضه (نسبت به مقیاس‌های بزرگ‌تر نظیر همه گستره ایران زمین) و تغییرات جزئی در مقادیر بارش پایگاه PERSIANN-CDR انجام گرفته است.

جدول ۲. نتایج شاخص‌های آماری

ماه میلادی	شاخص آماری						
	CC	RMSE(mm)	ME(mm)	BIAS (%)	POD	FAR	CSI
Jan	۰٫۷۳	۷٫۱۹	-۰٫۳۳	-۰٫۰۲۱۲۲	۰٫۵۸	۰٫۵۱	۰٫۵۸
Feb	۰٫۶۱	۶٫۴۵	-۰٫۱۹	-۰٫۰۲۱۳۲	۰٫۵۲	۰٫۴۱	۰٫۵۵
Mar	۰٫۶۹	۴٫۲۲	-۰٫۲۲	-۰٫۰۱۲۲۱	۰٫۵۴	۰٫۵۳	۰٫۵۴
Apr	۰٫۷۴	۲٫۳۳	-۰٫۱۳	-۰٫۰۱۱۰۳	۰٫۵۶	۰٫۵۷	۰٫۵۵
May	۰٫۷۷	۰٫۱۸	-۰٫۱۵	-۰٫۰۱۴۰۱	۰٫۴۵	۰٫۵۵	۰٫۵۳
Jun	۰٫۷۴	۰٫۰۱	۰٫۰۵	-۰٫۰۲۱۰۲	۰٫۴۱	۰٫۵۲	۰٫۵۵
Jul	۰٫۴۴	۰٫۴۲	۰٫۰۶	-۰٫۰۱۱۱۲	۰٫۵۱	۰٫۵۲	۰٫۵۱
Aug	۰٫۲۴	۰٫۳۱	-۰٫۰۴	-۰٫۰۱۱۶۸	۰٫۴۴	۰٫۵۳	۰٫۵۲
Sep	۰٫۲۳	۰٫۱۳	۰٫۰۳	-۰٫۰۲۱۵۷	۰٫۳۳	۰٫۵۳	۰٫۵۱
Oct	۰٫۴۵	۱٫۰۷	-۰٫۰۲	-۰٫۰۱۱۹۳	۰٫۴۷	۰٫۵۰	۰٫۵۹
Nov	۰٫۶۲	۳٫۴۱	-۰٫۱۱	-۰٫۰۱۳۹۵	۰٫۵۱	۰٫۵۲	۰٫۵۷
Dec	۰٫۶۳	۵٫۰۹	-۰٫۲۲	-۰٫۰۱۰۷۷	۰٫۵۴	۰٫۵۴	۰٫۵۲



شکل ۲. مقادیر ماهانه بارش مشاهداتی و پایگاه PERSIANN-CDR



شکل ۳. سری زمانی بارش مشاهداتی و پایگاه PERSIANN-CDR

پیکره‌بندی و آماده‌سازی مدل SWAT

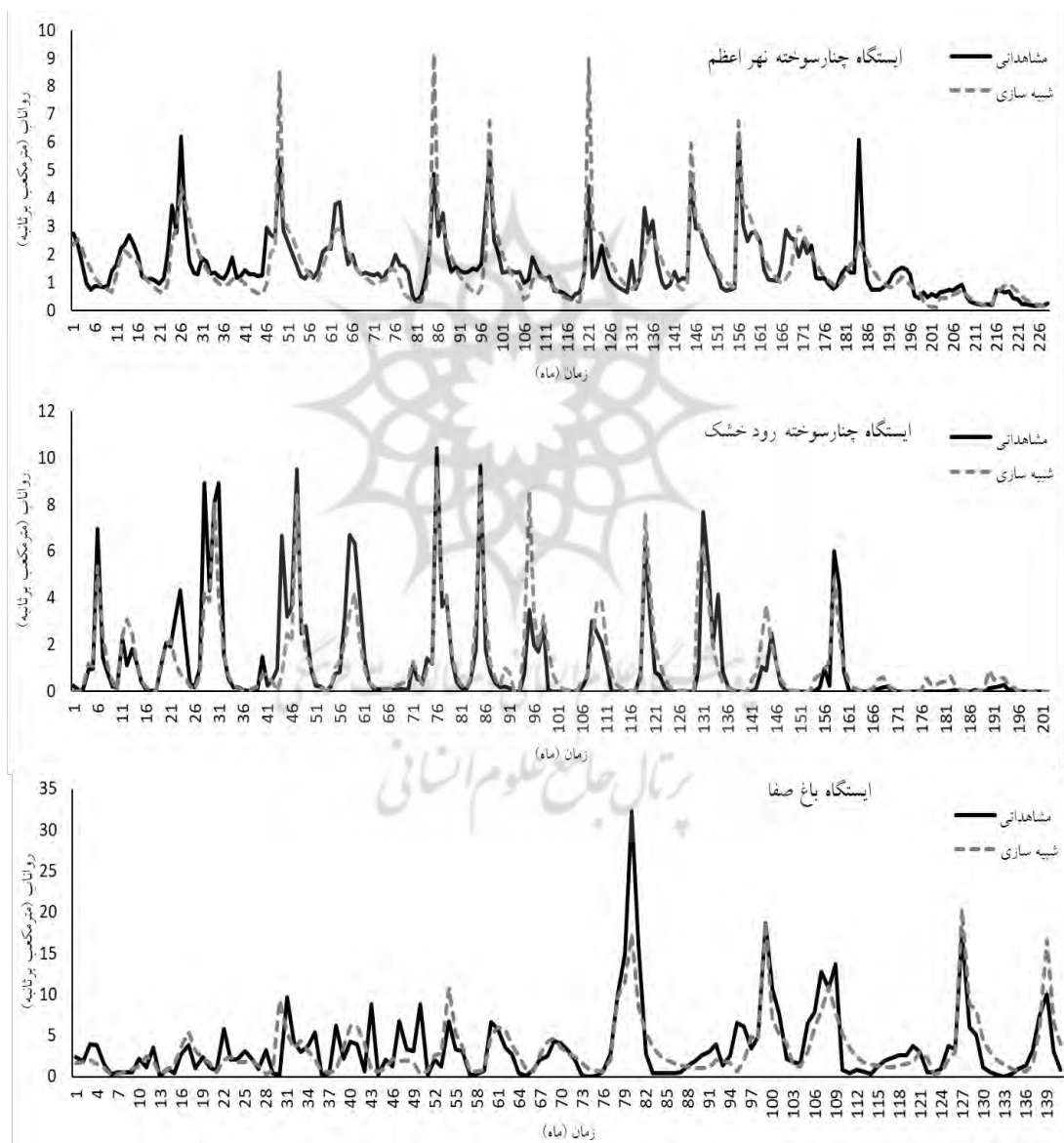
خلاصه نتایج دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ سری زمانی رواناب شبیه‌سازی شده توسط هر دو پایگاه بارش آمده است. واسنجی و اعتبارسنجی برای پایگاه اقلیمی مشاهداتی مشخص کرد که پارامترهای مربوط به جریان‌ات پایه و رواناب سطحی دارای حساسیت بسیار زیادی هستند. مدل توانست برای سه ایستگاه آب‌سنجی مقادیر ضریب تبیین را بالای ۰/۶ برای دوره واسنجی و بالای ۰/۶۵ را برای دوره اعتبارسنجی نشان دهد. مقادیر ضریب تبیین و کارایی نش- ساتکلیف برای شبیه‌سازی ماهانه رواناب در آستانه ۰/۶ و بالاتر قابل قبول است. بهترین نتیجه مربوط به ایستگاه چنار سوخته خشک با مقدار ۰/۷۲ در واسنجی و ۰/۸۱ در دوره اعتبارسنجی و همچنین ضریب نش- ساتکلیف ۰/۷۲ برای دوره واسنجی و ۰/۷۸ برای دوره اعتبارسنجی بود.

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی به وسیله PERSIANN-CDR مشخص کرد که این پایگاه توانایی زیادی در شبیه‌سازی رواناب ندارد و نتایج دارای خطای بسیاری است. بهترین نتیجه در ایستگاه چنار سوخته خشک رقم خورد. بالاترین مقدار ضریب تبیین و کارایی نش- ساتکلیف در ایستگاه چنار سوخته خشک به ترتیب با ۰/۵۹ و ۰/۲۱ رقم خورده است. به طور کلی، با توجه به نتایج مشخص شده، PERSIANN-CDR نتوانسته است برآورد خوبی از رواناب داشته باشد. ذکر این نکته لازم است که مدل ابتدا با داده‌های مشاهداتی واسنجی شد. سپس، با تغییر دادن ورودی‌های بارش مدل و ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای واسنجی شده، مدل بدون واسنجی مجدد برای پایگاه PERSIANN-CDR استفاده شد.

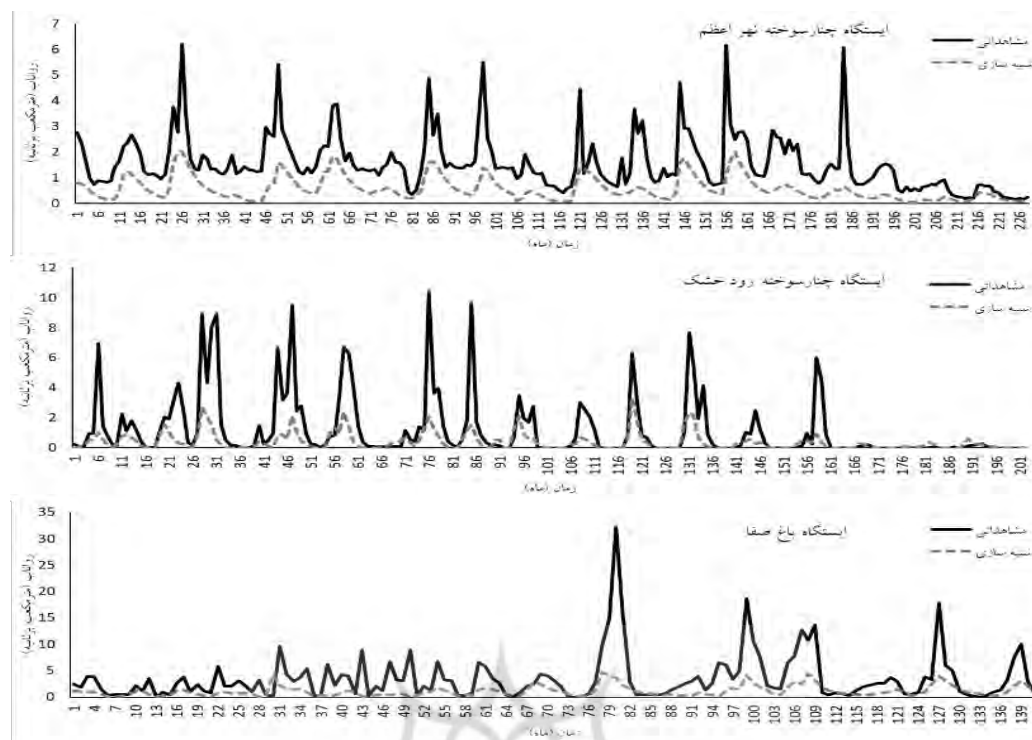
ارزیابی و تحلیل مطلوبیت عدم قطعیت نتایج مدل با استفاده از شاخص‌های P-factor و R-factor انجام شد. شاخص P-factor بیانگر درصدی از داده‌های مشاهداتی است که در باند ۹۵ درصد اطمینان شبیه‌سازی شده توسط مدل قرار می‌گیرد و شاخص R-factor بیانگر متوسط ضخامت باند عدم قطعیت ۹۵ درصد اطمینان تقسیم بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی است. مقادیر بیشتر P-factor (نزدیک‌تر به یک) و کمتر R-factor (نزدیک‌تر به صفر) بیانگر نتایج بهتر مدل در شبیه‌سازی انجام شده است. نتایج P-factor و R-factor برای داده‌های مشاهداتی در وضعیت مناسب و به طور متوسط حدود ۰/۵ برای همه ایستگاه‌ها به دست آمد. در جدول ۴ برخی از پارامترهای حساس مدل آمده است.

جدول ۳. نتایج شاخص‌های آماری مدل SWAT

ایستگاه	دوره	R2		NS	
		مشاهداتی	PERSIANN-CDR	مشاهداتی	PERSIANN-CDR
چنار سوخته اعظم	واستجی	۰٫۶۸	۰٫۵۷	۰٫۵۲	۰٫۰۱
	اعتبارسنجی	۰٫۷۳	۰٫۵۰	۰٫۰۶	۰٫۰۴
چنار سوخته خشک	واستجی	۰٫۷۲	۰٫۵۹	۰٫۷۲	۰٫۲۱
	اعتبارسنجی	۰٫۸۱	۰٫۵۱	۰٫۷۸	۰٫۲۰
باغ صفا	واستجی	۰٫۰۶	۰٫۴۶	۰٫۰۶	۰٫۰۱
	اعتبارسنجی	۰٫۶۵	۰٫۴۴	۰٫۶۶	۰٫۰۱



شکل ۴. سری زمانی شبیه‌سازی شده برای داده‌های مشاهده‌ای بارش



شکل ۵. سری زمانی شبیه‌سازی شده برای داده‌های بارش PERSIANN-CDR

جدول ۴. برخی از پارامترهای حساس و دامنه مقادیر نهایی آن‌ها

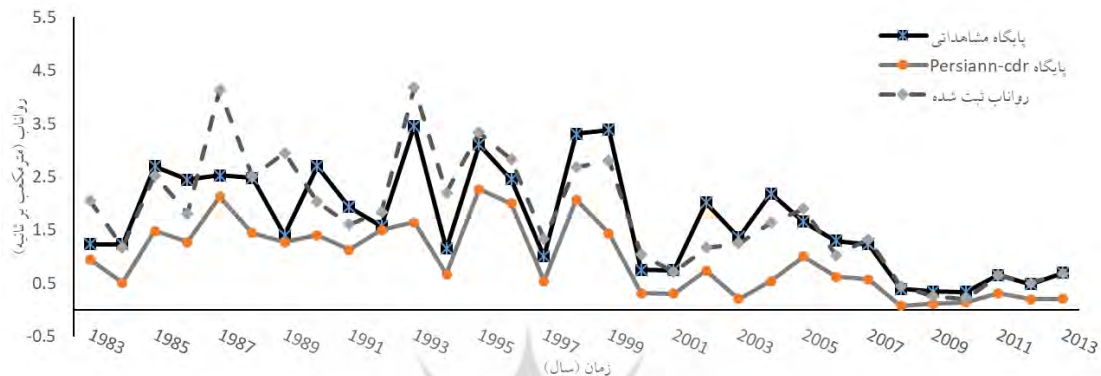
پارامتر	واحد	روشن‌جای‌گزینی ^۱	دامنه تغییرات
SHALLST.gw	mm	v	[۳, ۱۲۷]
GW_DELAY.gw	day	v	[۱۰, ۲۰]
GW_REVAP.gw	-	v	[۰/۰۱۵, ۰/۰۱۶]
PLAPS.sub	-	v	[۱, ۸]
TLAPS.sub	-	v	[۷, ۱۰]
CN2.mgt	-	r	[۰/۰۱, ۰/۳۸]
HRU_SLP.hru	m.m	v	[۰/۷۵, ۰/۸۴]
LAT_TTIME.hru	day	v	[۲۲, ۳۲]
SOL_BD.sol	-	r	[۰/۱۹, ۰/۵]
ALPHA_BF.gw	-	v	[۰/۴۶, ۰/۶۳]
SOL_AWC.sol	-	r	[۰/۵, ۰/۳]

ارزیابی دقت PERSIANN-CDR و پایگاه مشاهداتی در شبیه‌سازی ماهانه و سالانه رواناب
 شبیه‌سازی رواناب منطقه در مقیاس سالانه نشان داد که متوسط رواناب شبیه‌سازی شده با استفاده از پایگاه مشاهداتی بارش ۱/۶۸ متر مکعب در ثانیه، متوسط رواناب شبیه‌سازی شده توسط PERSIANN-CDR، ۰/۸۴ متر مکعب بر ثانیه، و متوسط رواناب ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری ۱/۷۷ متر مکعب بر ثانیه بوده است. ضریب تبیین بین مقادیر

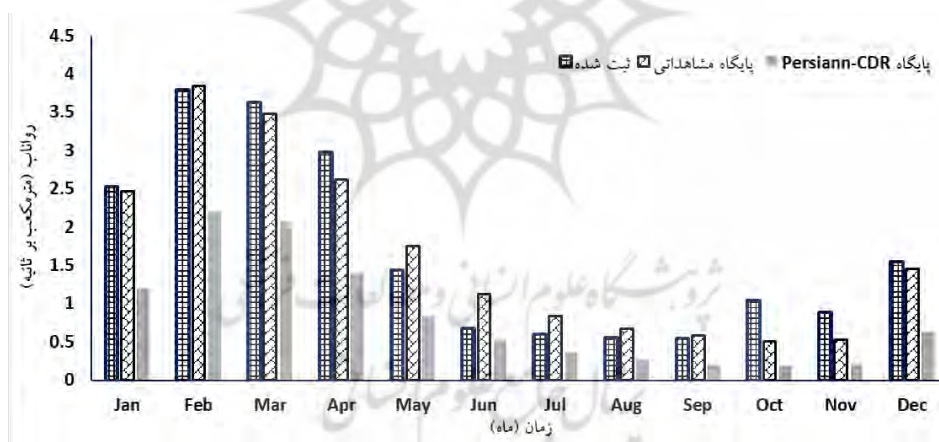
1. v = Replace, r =Relative

ثبت‌شده و شبیه‌سازی‌شده با پایگاه مشاهداتی ۰/۶۹ و ضریب تبیین مقادیر ثبت‌شده و شبیه‌سازی‌شده با پایگاه PERSIANN-CDR، ۰/۴۸ به‌دست آمد.

در مقیاس ماهانه، در شکل ۶، PERSIANN-CDR در همه ماه‌ها رواناب را همانند داده‌های بارش نسبت به داده‌های ثبت‌شده کمتر برآورد کرده است. پایگاه مشاهداتی در قیاس با رواناب ثبت‌شده در ماه‌های فصل پاییز کمتر از مقادیر واقعی رواناب را شبیه‌سازی کرده است.



شکل ۶. سری زمانی سالانه رواناب شبیه‌سازی‌شده توسط هر دو پایگاه و رواناب ثبت‌شده



شکل ۷. متوسط ماهانه بلندمدت رواناب شبیه‌سازی‌شده توسط هر دو پایگاه و رواناب ثبت‌شده

بر اساس نتایج این پژوهش، که با استفاده از محصول ماهواره‌ای PERSIANN-CDR انجام شد، مشخص شد که این پایگاه ماهواره‌ای، برخلاف نتایج سایر پژوهش‌های انجام‌شده (که در مقدمه تشریح شده است) با پایگاه‌های اقلیمی واکاوی‌شده جهانی، در شبیه‌سازی با مدل SWAT این پایگاه نمی‌تواند دقت زیادی در شبیه‌سازی داشته باشد. خطای تخمینی بارش و کمتر برآورد کردن آن (به طور متوسط ۷۰ میلی‌متر در سال) توسط PERSIANN-CDR به طور مستقیم به مدل وارد شده و باعث تولید خطا شده است. نتایج ارزیابی دقت بارش با پژوهشی که کتیرایی بروجردی (۱۳۹۲) انجام داده است همخوانی دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با واکاوی دقت داده‌های بارش پایگاه ماهواره‌ای PERSIANN-CDR در خصوص میزان برآورد بارش روشن شد که این پایگاه داده در کلیه ماه‌های سال مقادیر بارش را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. شبیه‌سازی رواناب با استفاده از این محصول ماهواره‌ای بیانگر ضریب تبیین و کارایی نش- ساتکلیف ۰/۵۹ و ۰/۲۱ است.

به دلیل اینکه پایگاه‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR در قاره آمریکا شمالی توسعه یافته است و این پایگاه در این منطقه با توجه به شرایط اقلیمی این منطقه و با توجه به داده‌های مشاهداتی واسنجی شده است، در سایر نقاط دنیا مشکلاتی نظیر کم‌برآورد بارش را دارد؛ در ایران این نتایج را کتیرایی بروجردی (۱۳۹۲) به‌دست آورده بود. به همین دلیل، بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CDR با دقت کمی رواناب را شبیه‌سازی کرده است.

مقایسه این پایگاه بارش ماهواره‌ای در همین حوضه نشان می‌دهد که این پایگاه نسبت به پایگاه‌های NCEP CFSR و CRU (ضریب تبیین و نش در حدود ۰/۶ برای هر دو پایگاه) در برآورد بارش و همچنین برآورد رواناب از دقت کمتری برخوردار بوده است (عینی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین، در دیگر پژوهش مشابه انجام‌شده در همین حوضه، که از پایگاه ملی اسفزاری استفاده شده است، نشان داده شد که این پایگاه بازنحلیل‌شده توانایی بسیار زیادی در شبیه‌سازی رواناب دارد (ضریب تبیین و نش در حدود ۰/۶۵ برای پایگاه اسفزاری) و این نتایج برخلاف نتایج حاصل از این پژوهش است (عینی و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین، نتایج این پژوهش با پژوهش‌های مشابه انجام‌شده در همین حوضه آبریز این نکته را مشخص می‌کند که این پایگاه نسبت به پایگاه‌های بازنحلیل‌شده (اسفزاری، NCEP CFSR، و CRU) دقت کمتری دارد.

مقایسه نتایج حاصل با مطالعات پیشین نشان داد که مقیاس مکانی پایگاه‌های اطلاعاتی اقلیمی نقش مهمی در نتایج به‌دست‌آمده دارند. مقیاس‌های کوچک از نظر مکانی در برخی حوضه‌ها دقت کمتری از خود نشان می‌دهند؛ این یافته برخلاف یافته‌های این پژوهش است (تیمیگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ کسه و همکاران، ۲۰۱۵).

همان‌طور که یافته‌ها نشان داد مقادیر بارش برآوردشده همواره کمتر از مقادیر واقعی ثبت‌شده بر روی ایستگاه‌هاست. بر پایه یافته‌های حاصل از این پژوهش، محصول ماهواره‌ای PERSIANN-CDR بر روی پهنه حوضه دریاچه مهارلو، که در شرق زاگرس قرار دارد، دقت زیادی ندارد و در مدل نیمه‌توزیعی SWAT نمی‌تواند رواناب را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود قبل از به‌کارگیری داده‌های برآوردشده بارش این پایگاه داده ماهواره‌ای مقادیر خطا و بایاس آن در مقایسه با داده‌های مشاهده‌شده بر روی ایستگاه‌های باران‌سنجی به‌دست آید و سپس مقادیر بارش برآوردشده بر پایه بایاس به‌دست‌آمده اصلاح شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت مدیریت منابع آب وزارت نیرو به دلیل حمایت مالی از پروژه تحقیقاتی به کد WMGW4-۹۵۰۱۰ و مقاله حاضر مستخرج از آن تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- حاجی حسینی، ح؛ حاجی حسینی، م؛ نجفی، ع؛ مرید، س. و دلاور، م. (۱۳۹۳). ارزیابی تغییرات متغیرهای هواشناسی در بالادست حوضه هیرمند طی سده گذشته با استفاده از داده‌های اقلیمی CRU و مدل SWAT، *مجله تحقیقات منابع آب*، ۱۰(۳): ۳۸-۵۲.
- دارند، م. و زند کریمی، س. (۱۳۹۵). ارزیابی دقت داده‌های بارش مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی بر روی ایران، *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۰(۳): ۹۵-۱۱۳.
- عینی، م.ر؛ جوادی، س. و دلاور، م. (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل‌شده پایگاه‌های اقلیمی جهانی CRU و NCEP در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مدل SWAT، مطالعه موردی: حوضه آبریز مهارلو، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۱(۱): ۳۲-۴۴.
- عینی، م.ر؛ جوادی، س.؛ دلاور، م. و دارند، م. (۱۳۹۷). ارزیابی داده‌های بارش پایگاه ملی اسفزاری در برآورد رواناب و پایش خشک‌سالی منطقه‌ای، *مجله اکوهیدرولوژی*، ۵(۱): ۹۹-۱۱۰.
- غضنفری مقدم، م.؛ علیزاده، ا.؛ موسوی باسگی، م.؛ فرید حسینی، ع. و بنیان اول، م. (۱۳۹۰). مقایسه مدل PERSIANN با روش‌های درون‌یابی به منظور کاربرد در تخمین مقادیر بارندگی روزانه، *نشریه آب و خاک*، ۱: ۲۰۷-۲۱۵.
- کتیرایی بروجردی، پ.س. (۱۳۹۲). مقایسه داده‌های بارش ماهانه ماهواره‌ای و زمینی در شبکه‌ای با تفکیک زیاد روی ایران، *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۴: ۱۴۹-۱۶۰.
- مسعودیان، ا.؛ کیخسروی کیانی، م.ص. و رعیت‌پیشه، ف. (۱۳۹۳). معرفی و مقایسه پایگاه داده اسفزاری با پایگاه‌های داده GPCP و GPCP، *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۹(۱): ۷۳-۸۷.
- Auerbach, D.A.; Easton, Z.M.; Walter, M.T.; Flecker, A.S. and Fuka, D.R (2016). Evaluating weather observations and the climate forecast system reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics, *Hydrol. Process*, 30: 3466-3477.
- Casse, C.; Gosset, M.; Peugeot, C.; Pedinotti, V.; Boone, A.; Tanimoun, B.A. and Decharme, B. (2015). Potential of satellite rainfall products to predict Niger River flood events in Niamey, *Atmos. Res.*, 163: 162-176.
- Darand, M.; Amanollahi, J. and Zandkarimi, S. (2017). Evaluation of the performance of TRMM Multi-satellite Precipitation, Analysis (TMPA) estimation over Iran, *Atmospheric Research*, 190: 121-127.
- Darand, M.; Zerafati, O.; Kefayatmotlagh, R. and Samandar, R. (2015). Comparison between global and regional precipitation data bases with base station Asfazari precipitation Iran, *Geographical Research*, 3: 30-47.
- Darand, M. and Zand Karimi, S. (2016). Evaluation of the accuracy of the Global Precipitation Climatology Center (GPCP) data over Iran, *Journal of Iran Geophysical*, 103: 95-113.
- Dile, Y.T. and Srinivasan, R. (2014). Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: An application in the Blue Nile River Basin, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 50: 1226-1241.
- Eini, M.R., Javadi, S. and Delavar, M. (2018). Evaluating the performance of CRU and NCEP CFSR global reanalysis climate datasets, in hydrological simulation by SWAT model, Case Study: Maharlu basin, *Iran-Water Resources Research* 14(1), 32-44 DOI: 10.13140/RG.2.2.24445.41444.

- Eini, M.R., Javadi, S., Delavar, M., and Darand, M. (2018). Assessment of Asfezari national database precipitation data in runoff evaluating and monitoring regional drought, *Iranian Journal of EcoHydrology*, (5)1, 95-110, <http://dx.doi.org/10.22059/ije.2017.235625.643>.
- Fuka, D.R.; Walter, M.T.; MacAlister, C.; Degaetano, A.T.; Steenhuis, T.S. and Easton, Z.M. (2014). Using the climate forecast system reanalysis as weather input data for watershed models, *Hydrol. Process*, 28: 5613-5623.
- Ghazanfari, M.M.; Alizadeh, A.; Mosavi, B.M.; Farid, H.A. and Banaian, A.M. (2010). Comparing PERSIANN with interpolation methods in order to application estimation daily rainfall, *Soil and Water Journal*, 1: 207-215.
- HajiHosseini, H.; HajiHosseini, M.R.; Morid, S. and Delavar, M. (2013). Assessment of changes in hydro-meteorological variables upstream of Helmand Basin during the last century using CRU data and SWAT model, *Iran-Water Resources Research*, 17: 38-52.
- Katiraie-Boroujerdy, S.P. (2012). Comparing satellite and ground base monthly data rainfall in high spatial over Iran, *Iran Geophysics Journal*, 1: 149:160.
- Katiraie-Boroujerdy, S.P.; Nasrollahi, N.; Hsu, KL. and Sorooshian, S. (2016). Quantifyin the reliability of four global datasets for drought monitoring over a semiarid region: Theor, *Appl. Climatol.*, 123: 387-398.
- Masoudian, A.; Keykhosravi, M. and Rayat Pisheh, F. (2015). Intruduction and evaluation Asafzari database with GPCC, GPCP, CMAP, *Geographical Research*, 19: 73-88.
- Mei, Y.W.; Anagnostou, E.N.; Nikolopoulos, E.I. and Borga, M. (2014). Error analysis of satellite precipitation products in mountainous basins, *J. Hydrometeorol*, 15: 1778-1793.
- Miao, C.; Ashouri, H.; Hsu, K-L.; Sorooshian, S. and Duan, Q. (2015). Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China, *Journal of Hydrometeorology*, 16: 1387-1396.
- Monteiro, J.A.F.; Strauch, M.; Srinivasan, R.; Abbaspour, K. and Gücker, B. (2016). Accuracy of grid precipitation data for Brazil: Application in river discharge modelling of the Tocantins catchment, *Hydrol. Process.*, 30: 1419-1430.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Srinivasan, R. and Williams, J.R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool*, User Manual, Version 2012, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, Tex, USA.
- Nikolopoulos, E.I.; Anagnostou, E.N. and Borga, M. (2013). Using high-resolution satellite rain-fall products to simulate a major flash flood event in northern Italy, *J. Hydrometeorol.*, 14: 171-185.
- Nkiaka, E.; Nawaz, N. and Lovett, JC. (2017). Evaluating global reanalysis datasets as input for hydrological modelling in the sudano-sahel region, *Hydrology*, 4(1): 13.
- Qian Z., Weidong Xuan; Li, Liu and Yue-Ping, Xu (2016). Evaluation and hydrological application of precipitation estimates derived from PERSIANN-CDR, TRMM 3B42V7, and NCEP-CFSR over humid regions in China, *Hydrol. Process*, 42: 1832-1861.
- Thiemig, V.; Rojas, R.; Zambranobigiarini, M. and Roo, A.D. (2013). Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo basin, *J. Hydrol*, 499: 324-338.