

ارزیابی دقت محصولات بارش ماهواره‌ای در تخمین بارش‌های مربوط به ماه‌های سیلابی (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد یامچی اردبیل)

مهدی کنزی حق^۱، اتابک فیضی^{۲*}، فرهاد هوشیاری پور^۳، سید سعید راثی نظامی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۴. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۸/۰۸؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۰/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۱/۱۱)

چکیده

تخمین داده‌های بارش توسط محصولات ماهواره‌ای با دقت زیاد در مقیاس زمانی و مکانی که از اجزای اصلی مدل‌های هیدرولوژیکی است، کمک زیادی به مدیریت منابع آب خواهد کرد. از این‌رو، در این پژوهش اقدام به ارزیابی دقت داده‌های بارش و همچنین، اصلاح اریبی آن‌ها به روش چندک (RQUANT) برای ارتقای عملکرد داده‌های ماهواره‌ای در حوضه آبریز سد یامچی واقع در استان اردبیل شد. داده‌های ماهواره‌ای استفاده‌شده شامل داده‌های بارش PERSIANN-CCS، PDIR-Now و GPM در مقیاس زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه برای ماه‌های پربارش منطقه است که طی یازده سال توسط شاخص‌های آماری متوسط بارش، انحراف معیار و ضریب تغییرات انتخاب شدند. اعمال روش اصلاح اریبی توانست تا حد امکان عملکرد داده‌های ماهواره‌ای را در ماه‌های پربارش بهبود ببخشد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از ماهواره GPM در مقیاس ماهانه با داده‌های بارش زمینی نشان داد این محصول نسبت به مدل‌های PERSIANN-CCS و PDIR-Now از عملکرد بهتری برخوردار بوده و دارای شاخص MAE و RMSE برابر ۴/۶۶ و ۹/۷۰ و ضریب همبستگی ۰/۷۴ است، در حالی که این مقادیر برای مدل PERSIANN-CCS و PDIR-Now به ترتیب برابر ۴۵/۲۴، ۶۲/۰۳ و ۰/۳۶ و ۷/۰۹، ۱۳/۵۲، ۰/۲۷ است. به همین ترتیب، در مقیاس روزانه محصول بارش ماهواره‌ای GPM عملکرد مطلوب‌تری را ارائه داد. مقادیر آماری برای ماهواره GPM در مقیاس ساعتی نیز به ترتیب برابر ۰/۹۱، ۲/۶۶ و ۰/۰۶ به دست آمد. به طور کلی، بارش به‌دست‌آمده از GPM در مقایسه با سایر ماهواره‌ها نتایج بهتری ارائه می‌دهد، اگرچه در مقیاس روزانه و ساعتی نتایج مطلوبی نسبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده حاصل نشد.

واژه‌های کلیدی: سد یامچی، ماه‌های سیلابی، اصلاح اریبی، سنجش از دور، بارش ماهواره‌ای.

مقدمه

بارش یکی از مؤلفه‌های مهم هیدرولوژی در طبیعت است. فقدان یک سیستم قابل اعتماد و یک سیستم مشاهده گسترده یکی از چالش‌ها و مشکلات مهم در آنالیز داده‌های بارش، پیش‌بینی هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب ایران است. از طرف دیگر، داده‌های ماهواره‌ای دارای ویژگی‌های مهمی مانند وضوح مکانی و زمانی بالا، پوشش مکانی جهانی روی بیشتر نقاط جهان و نقاط دورافتاده هستند. این محصولات علاوه بر مزایای زیاد دارای محدودیت‌هایی مانند خطاهای بازیابی، عدم قطعیت در نمونه‌برداری و همچنین، خطای ذاتی ناشی از اندازه‌گیری غیرمستقیم هستند (میان‌آبادی، ۱۳۹۲؛ شریفی و همکاران، ۱۳۹۵) [۱ و ۲]. در حقیقت، دسترسی به داده‌های بارش زمینی با کیفیت بالا در مناطق مختلف ایران بسیار محدود است و به عنوان یک منبع جایگزین، محصولات بارش ماهواره‌ای که پوشش فضایی بالایی از داده‌های ورودی برای مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف فراهم می‌کند، می‌توانند برای حوضه‌های غیر قابل دسترس و کمیاب در کشورهای در حال توسعه مانند ایران مفید باشند. استفاده از الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای برای اندازه‌گیری بارندگی در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه بوده است. از این‌رو، تعداد زیادی از مدل‌های پیشرفته برای برآورد ویژگی‌های بارش ایجاد شده‌اند که دارای توانایی بالای آشکارسازی زمانی و مکانی هستند و در دسترس عموم قرار گرفته‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل PERSIANN-CCS، PDIR-Now و GPM اشاره کرد. در این راستا، تلاش‌های زیادی برای ارزیابی عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای روی مناطق مختلف با شرایط جغرافیایی و آب‌وهوایی مختلف صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Xie و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش روزانه و داده‌های ماهواره‌ای PERSIANN و TRMM به بررسی و مقایسه دقت این محصولات پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد همبستگی بین TRMM و PERSIANN برای بیشتر نقاط بین ۰/۴ تا ۰/۶ بوده است [۳]. Hong و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی و مقایسه داده‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک در مقیاس‌های زمانی روزانه و

ساعتی در منطقه شمال غربی مکزیک به این نتیجه رسیدند که داده‌های بارش این ماهواره از تخمین زمانی- مکانی خوبی برخوردار است [۴]. جوانمرد و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل TRMM-3B42 و مقایسه آن با داده‌های مشاهداتی در سطح کل ایران به این نتیجه رسیدند که مدل TRMM-3B42 حدود ۲۵ درصد متوسط بارش سالانه کل کشور را کمتر تخمین می‌زند [۵]. Beighley و همکاران (۲۰۱۱) با مقایسه داده‌های بارش جهانی ماهواره‌ای و داده‌های بارش مشاهداتی به این نتیجه رسیدند که داده‌های ماهواره‌ای از نظر توانایی برای کاربرد در مدل‌سازی هیدرولوژیکی بر یکدیگر برتری ندارد و بسته به نوع توپوگرافی و ویژگی‌های گسترده به کار برده می‌شوند [۶]. Cai و همکاران (۲۰۱۲) داده‌های بارش شمال غرب چین را با داده‌های TRMM ارزیابی و مقایسه کردند و به این نتیجه دست یافتند که همبستگی مناسب و معناداری بین داده‌های این مدل و داده‌های مشاهداتی وجود دارد [۷]. حجازی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های بارش TRMM-3B42 و داده‌های به‌دست‌آمده از درون‌یابی کریجینگ، به مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش یادشده نشان داد میزان دقت این نوع داده‌ها در سطح ایران متفاوت است [۸]. Kizza و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و مقایسه آن‌ها با داده‌های به‌دست‌آمده از روش درون‌یابی کریجینگ به این نتیجه رسیدند که مقدار Bias برای داده‌های بارش مدل PERSIANN بیشتر بوده و دقت ضریب همبستگی با تغییرات درون‌سالی برای داده‌های TRMM مناسب‌تر است [۹]. Chen و همکاران (۲۰۱۳) با ارزیابی داده‌های بارش اقیانوس آرام و مدل بارش TRMM-3B42 به این نتایج دست یافتند که داده‌های بارش ماهواره موردنظر از تطابق و همبستگی خوبی نسبت به داده‌های مشاهداتی برخوردار است [۱۰]. میان‌آبادی و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی مدل CMORPH در شمال شرق ایران پرداختند. یافته‌های پژوهش آن‌ها از این قرار بود که این مدل در مقیاس روزانه خطای بیشتری نسبت به داده‌های زمینی دارد، ولی در مقیاس ماهانه و فصلی از ریزبینی بالایی برخوردار است [۱۱]. شیروانی و فخری‌زاده (۲۰۱۴) داده‌های بارش روزانه ۳۸ ایستگاه باران‌سنجی، با محصول نسخه ۷ ماهواره

سفیدرود و با استفاده از داده‌های رطوبت سطحی ASCAT اقدام به ارزیابی آن‌ها پرداختند و نتایج نشان داد استفاده از داده‌های سنجش از راه دور می‌تواند یک راهکار مناسب برای حوضه‌هایی که فاقد داده‌های زمینی هستند، مناسب باشد [۱۸]. احمدی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بارش CHIRPS و تلفیق آن‌ها با مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب IHACRES اقدام به برآورد رواناب در حوضه آبریز گرگان‌رود در مقیاس روزانه پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد مدل یادشده از عملکرد کلی مناسبی برخوردار است [۱۹].

بررسی تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد استفاده از محصولات بارش ماهواره‌ای بسیار گسترده و روزبه‌روز در حال افزایش است. یک جمع‌بندی از کارهای انجام‌شده در مطالعات نشان می‌دهد داده‌های ماهواره‌ای در تخمین میزان بارش دقت قابل قبولی داشته‌اند، اگرچه در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر دقت‌ها کاهش می‌یابد. از آنجا که تخمین میزان دقیق سیلاب در مدیریت آن نقش اساسی دارد، در این تحقیق به بررسی قابلیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای PDIR-Now، PERSIANN-CCS و GPM در مقیاس زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه در ماه‌های سیلابی برای تخمین بارش حوضه آبریز سد یامچی در استان اردبیل شده است. بدیهی است در مطالعات قبل ارزیابی مدل‌ها در همه ماه‌های سال انجام شده که در بسیاری موارد روزها و ماه‌ها بدون بارش یا با بارش اندک بوده است. در حالی که از منظر منابع آب ماه‌های سیلابی بسیار اهمیت دارد که مورد توجه این مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

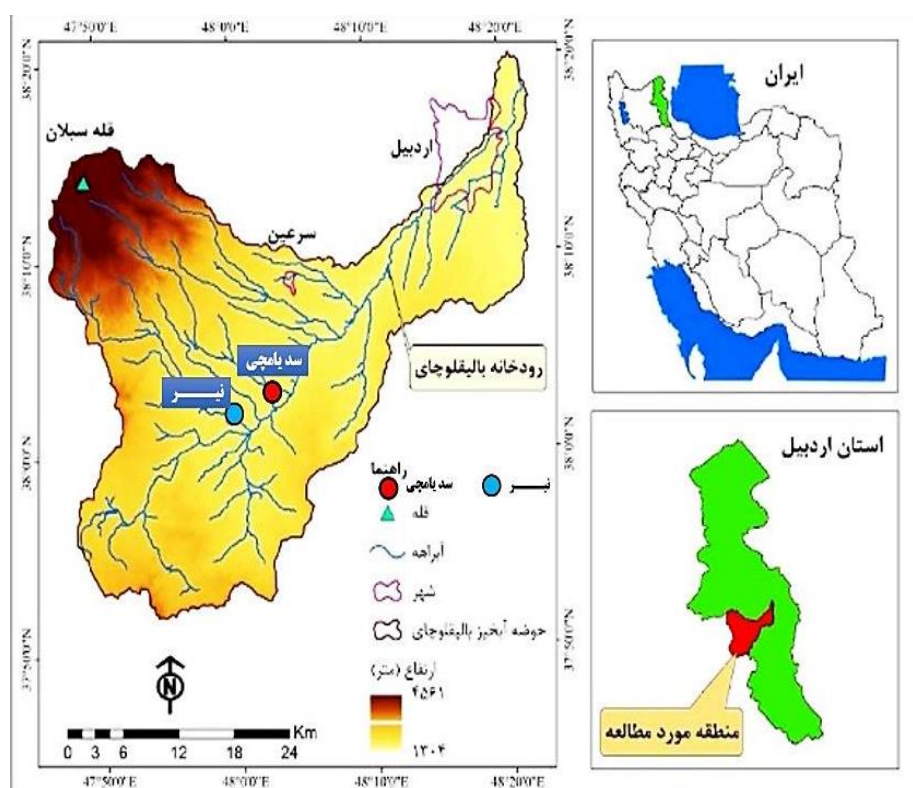
منطقه مطالعه شده

حوضه مورد مطالعه در این تحقیق، حوضه آبریز سد یامچی است که به دلیل وجود سد یامچی در بالادست شهر اردبیل و بحث اهمیت مدیریت سیلاب‌های ورودی سد و کنترل آن‌ها، این منطقه به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است. این سد در شمال غرب ایران و در ۲۵ کیلومتری شهر اردبیل در استان اردبیل واقع شده است. استان اردبیل با مختصات $38^{\circ}38'$ شمالی و $48^{\circ}5'$ شرقی واقع شده و اراضی تحت پوشش در محدوده طول

TRMM در استان فارس را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آن‌ها نشان داد ضریب همبستگی معناداری بین داده‌های بارش ماهواره‌ای و زمینی در بیشتر مناطق استان فارس وجود دارد، به طوری که برای همه ایستگاه‌ها به‌جز شش ایستگاه در مقیاس سالانه به‌ترتیب 0.08 تا 0.95 و 0.64 تا 0.93 و برای مقیاس ماهانه بین 0.64 تا 0.96 و 0.5 تا 0.9 بوده است [۱۲]. معظمی و همکاران (۲۰۱۴) اقدام به مقایسه داده‌های بارشی چهار منبع PERSIANN، TMPA-3B42RT، TMPA-3B42V7، CMORPH با داده‌های بارش زمینی در کل سطح ایران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شاخص (Rbias) در منبع بارشی TMPA-3B42V7 عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها دارد [۱۳]. Wang و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از ماهواره GPM و ماهواره TRMM اقدام به ارزیابی داده‌های بارش زمینی در حوضه رودخانه بیجینگ کشور چین کردند و به این نتیجه رسیدند که داده‌های ماهواره‌ای GPM از دقت و ضریب همبستگی بالایی برخوردار است [۱۴]. حسینی مغاری و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های بارش PCDR، GPCC، CRU و UDEL اقدام به مقایسه آن‌ها با داده‌های بارش ۸۵ ایستگاه سینوپتیک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تمامی منابع بارش در دسترس مقدار بارش سالانه‌ای که بیشتر از ۶۰۰ میلی‌متر دارند را کم برآورد می‌کند و در مناطقی که مقدار بارش سالانه کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر است، مقدار بارش شبیه‌سازی شده بیشتر از مقدار واقعی نشان داده شده است [۱۵]. پریسوج و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های بارش PERSIANN و TRMM و تلفیق آن‌ها با مدل بارش-رواناب HEC-HMS اقدام به ارزیابی رواناب و سیلاب حاصله از این دو منبع بارشی پرداختند. نتایج پژوهش یادشده بیانگر آن بود که در مقیاس روزانه داده‌های TRMM برای شبیه‌سازی سیلاب بهتر از داده‌های PERSIANN است [۱۶]. شایقی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل VIC-3L در حوضه آبریز سفیدرود اقدام به بررسی کارایی مدل پرداختند و به این نتیجه رسیدند که کارایی دو مدل ECMWE و APHROPITE در تخمین بارش در مقیاس روزانه از عملکرد بهتری برخوردار است، اما در مقیاس ماهانه داده‌های بارش PERSIANN مناسب‌ترند [۱۷]. کوهی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل VIC-3L در حوضه

۴۰۰ میلی‌متر در نوسان است. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مطالعه شده را نشان می‌دهد. موقعیت خاص جغرافیایی منطقه مطالعاتی سبب شده است که حوضه آبریز بالیقوچای در فصل‌های سرد سال تحت تأثیر توده‌های هوایی مهاجر از شمال، شمال غرب و غرب قرار گیرد. در فصل تابستان نیز گاهی سیستم‌های کم‌فشار باران‌زا بر این منطقه تأثیر می‌گذارند و بارندگی‌های تابستانه را در این مناطق باعث می‌شوند. بخش‌های شرق حوضه به صورت محسوس تحت تأثیر اقلیم خزری قرار دارد و بر شرایط دمایی و رطوبتی آن اثر می‌گذارد و موجب تعدیل آب‌وهوا در این مناطق می‌شود. ویژگی سردی که ناشی از تأثیر توده‌های سرد شمالی، ارتفاع و عرض جغرافیایی است، صفت مشترک اقلیم‌های گوناگون منطقه است. همچنین، در این تحقیق از داده‌های ایستگاه سینوپتیک نیر در مقیاس زمانی شش‌ساعته، روزانه و ماهانه با موقعیت جغرافیایی $38^{\circ}21'$ عرض شمالی و $59^{\circ}47'$ طول شرقی در بازه یازده‌ساله استفاده شده است.

جغرافیایی $48^{\circ}10'$ تا $48^{\circ}28'$ شرقی و عرض جغرافیایی $38^{\circ}12'$ تا $38^{\circ}27'$ است (شکل ۱). این سد در حوضه آبریز ارس و روی رودخانه بالیقوچای احداث شده است که رودخانه بالیقوچای سرشاخه اصلی رودخانه قره‌سو است. طول رودخانه، ۷۸ کیلومتر بوده و مقدار آبدهی سالیانه متوسط آن در ایستگاه الماس $121/4$ میلیون مترمکعب ثبت شده است. رودخانه بالیقوچای از گردنه بالیقلی در جنوب غربی شهرستان نیر حد فاصل دو رشته‌کوه (بزقوش) و سرشاخه‌های مهمی نظیر برجلوچای، سقزچی چای، آغلاغان، درویش‌چای و نیرچای نیز طی مسیر به این رودخانه می‌پیوندد و در نهایت نیز با پیوستن به رودخانه (قره‌سو) در شمال اردبیل تخلیه می‌شود که قسمت اعظم آن در شهرستان نیر قرار دارد. شهرهای اردبیل، نیر و سرعین که بیشتر شامل نواحی مرتفع کوهستانی هستند، در این حوضه قرار دارند. میانگین دمای روزانه در منطقه مطالعه شده 11 درجه سانتی‌گراد و متوسط تبخیر سالیانه 70 میلی‌متر است. همچنین، میزان نزولات جوی سالیانه در حوضه به طور متوسط از 250 تا



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز سد یامچی در استان اردبیل در شمال غرب ایران

داده‌های بارش ماهواره‌ای

داده‌های ماهواره‌مبنا^۱ PERSIANN یک الگوریتم تخمین بارندگی با استفاده از سنسورهای از سنسورهای غیرفعال مانند اسکندر قابل شبکه‌ی عصبی مصنوعی است. ورودی‌های پایه‌ی این مدل، دمای بالای ابر حاصل از تصاویر طیف مادون قرمز ابر توسط ماهواره‌های زمین‌مدار شامل GoEs8 و GoEs9 است (Hong et al., 2004). داده‌های PERSIANN-CCS نسل ارتقا یافته داده‌های ماهواره‌مبنا PERSIANN است. داده‌های این محصول با تفکیک مکانی $0.4^\circ / 4.4^\circ$ (کیلومتر) در طول عرض جغرافیایی و تفکیک زمانی ۳ ساعته در دسترس است. داده‌های بارش PERSIANN-CCS قادر به طبقه‌بندی ابرها بر اساس ارتفاع، محدوده جغرافیایی و تنوع جنس ابر است. چهار مرحله برای برآورد بارش توسط این محصول وجود دارد. ابتدا با استفاده از یک روش منطقه‌ای تصاویر ابرها از هم جدا می‌شود. سپس، در گام بعدی ویژگی‌های قسمت‌های جدا شده مانند آمار، هندسه و بافت در آستانه‌های مختلف دمای روشنایی ابر استخراج شده و ابرها به خوشه‌های جداگانه دسته‌بندی می‌شوند. در نهایت، با استفاده از روش تطابق احتمالات و انحراف معیار منحنی، رابطه بین دمای روشنایی تکه‌های ابر و میزان بارندگی برای هر خوشه به دست می‌آید (Mahrooghy et al. 2012) [۲۰].

داده‌های بارش PDIR-Now نوع جدیدی از داده‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN است. مزیت اصلی این داده‌ها در مقایسه با سایر مجموعه‌های اطلاعاتی، اتکای آن به تصاویر IR با فرکانس بالا است. در نتیجه، زمان تأخیر داده‌های این ماهواره از زمان وقوع بارندگی بسیار کوتاه است. همچنین، استفاده از الگوریتم PDIR-Now برای مدل‌سازی و تخمین بارش در وضوح مکانی-زمانی نتایج مناسبی را ایجاد کرده است. این مدل داده‌ها را با وضوح $0.4^\circ * 0.4^\circ / 4.4\text{Km} * 4.4\text{Km}$ و در بازه‌های زمانی یک‌ساعته، شش‌ساعته، روزانه، ماهانه و سالانه از اول مارس ۲۰۰۰ ارائه می‌دهد (Nguyen et al. 2020) [۲۱].

در سال ۱۹۹۷ ماهواره TRMM^۳ به فضا پرتاب شد. این ماهواره در مداری به ارتفاع ۳۵۰ کیلومتر و با زاویه‌ی میل

35° از استوا، قرار گرفت. ماهواره TRMM با استفاده از سنسورهای فعال و حسگرهای غیرفعال مانند اسکندر قابل مشاهده و مادون قرمز و تصویربردار مایکروویو با وضوح مکانی $0.25^\circ * 0.25^\circ$ اقدام به تهیه بارندگی‌های گرمسیری می‌کرد (Kummerow et al. 1998) [۲۲]. در تاریخ ۲۸ فوریه ۲۰۱۴ از مرکز فضایی ژاپن نسل جدید ماهواره‌های تخمین بارش به نام GPM^۴ با تجهیزات و سنسورهای پیشرفته، به جای ماهواره TRMM به فضا پرتاب شد. این ماهواره در ارتفاع ۴۰۷ کیلومتری از سطح زمین، به حرکت خود ادامه می‌دهد. این ماهواره می‌تواند با استفاده از تصویربردار مایکروویو GMI^۵ و رادار بارش دو فرکانس DPR^۶، بارش‌های برف و باران را مشاهده کند. ماهواره GPM محصول نهایی IMERG دارد که وضوح مکانی آن $0.1^\circ * 0.1^\circ$ است (Huffman et al. 2015) [۲۳].

تصحیح اریبی داده‌های بارش ماهواره‌ای

پیش‌بینی‌های اولیه حاصل از مدل‌های جهانی دارای خطای اریبی در میانگین و انحراف معیار پیش‌بینی‌ها است (Wu et al. 2011) [۲۴]. با استفاده از روش‌های تصحیح اریبی این امکان فراهم می‌شود که میزان تأثیرات خطای اریبی سیستماتیک کاهش یابد (Teutschbein et al. 2010) [۲۵]. یکی از روش‌های پرکاربرد برای اصلاح اریبی، روش نگاشت چنجدک است (Zollo et al. 2014; Boe et al. 2007) [۲۶]. در این روش یک تابع تبدیل h_x با استفاده از معادله خط بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های ماهواره‌ای به دست می‌آید که بر اساس این تابع می‌توان توزیع بارش‌های پیش‌بینی‌شده (P_f) را با توزیع بارش‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌ها (P_0) تنظیم و تعدیل کرد (شکل ۲). رابطه مورد استفاده برای این صورت معادله ۱ است (Piani et al., 2010; Gudmundsson et al., 2012) [۲۹]:

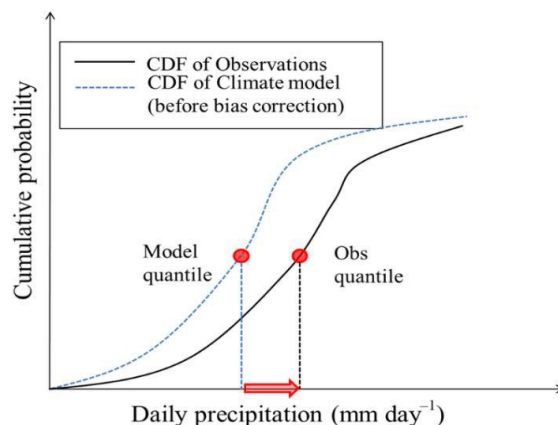
$$P_0 = h(P_f) \quad (۱)$$

در صورتی که متغیر مورد نظر دارای یک توزیع شناخته‌شده باشد، رابطه آن به شرح زیر بیان می‌شود (رابطه ۲):

$$P_F = F_0^{-1}(F_F(P_F)) \quad (۲)$$

4. Global Precipitation Measurement
5. GPM Microwave Imager
6. Dual-Frequency Precipitation Radar

1. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks
2. Cloud Classification System
3. Tropical Rainfall Measuring Mission



شکل ۲. روش نگاشت چندک برای تصحیح اریبی پیش‌بینی‌ها (Bum Kim et al., 2016) [۳۰]

QUANT) و چندک تجربی قوی (RQUANT) از پرکاربردترین روش‌هاست. در چندک تجربی مقادیر تابع توزیع تجمعی، بین سری زمانی مشاهدات و پیش‌بینی‌ها با فاصله‌های منظم محاسبه می‌شوند. اما در نگاشت چندک تجربی قوی، مقادیر روابط چندک- چندک با استفاده از رگرسیون خطی حداقل مربعات محاسبه می‌شوند. از بین دو روش (QUANT) و (RQUANT)، روش چندک تجربی قوی یا RQUANT نسبت به سایر روش‌ها نتایج بهتری را ارائه کرده است. پس از آماده‌سازی پیش‌بینی‌های خام داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های بارش ایستگاه سینوپتیک نیر در نرم‌افزار R فراخوانی شد و با کمک بسته qmap و با کمک روش RQUANT اصلاح اریبی صورت پذیرفت.

ارزیابی دقت بارش‌های ماهواره‌ای

در این مطالعه ارزیابی و صحت‌سنجی داده‌های بارش ماهواره‌ای، با داده‌های بارش در مقیاس زمانی ماهانه، روزانه و شش‌ساعته طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰ انجام شده است. در پژوهش حاضر سعی شده است که تا حد امکان رویدادها بر اساس میزان خود در محدوده مطالعه خود انتخاب شوند. بنابراین، معیار انتخاب داده‌ها بر این اساس بوده است که ماه‌های سیلابی و پربارش در منطقه انتخاب شده‌اند. برای ارزیابی بارش از شش شاخص آماری استفاده شده است. یکی از این شاخص‌ها Bias (معادله ۳) است که به مفهوم میانگین بارش داده‌های مشاهداتی و داده‌های ماهواره‌ای خلاصه می‌شود که می‌تواند منفی یا مثبت باشد. بایاس منفی نشان‌دهنده تخمین کم بارش

که در آن F_F تابع توزیع تجمعی $(CDF)^{-1}$ متغیر P_F و F_0^{-1} معکوس CDF متغیر P_0 است (Gudmundsson et al. 2012) [۳۱].

روش کار به این صورت است که چندک P_F هر عضو پیش‌بینی بارش توسط تابع توزیع تجمعی F_F محاسبه شده و چندک جدید با مقدار مشاهداتی در همان روز جایگزین می‌شود. برای مدل‌سازی روابط QUANTILE-QUANTILE در روش نگاشت چندک، تبدیلات آماری متعددی وجود دارد. تابع تبدیل از یک توزیع نظری برای حل رابطه ۲ استفاده می‌کند. از طرفی، برای مدل‌سازی رابطه QUANTILE-QUANTILE با کمک رابطه ۱ می‌توان مستقیم از تبدیلات پارامتری استفاده کرد. در نهایت، به جای در نظر گرفتن توزیع پارامتری، از توابع توزیع تجمعی تجربی در تبدیلات غیر پارامتری برای حل معادله ۲ یا رگرسیون‌های غیر پارامتری مانند SSPLIN، QUANT و RQUANT برای حل معادله ۱ استفاده می‌شود (Gudmundsson.2014) [۳۲].

در این پژوهش برای استفاده از روش نگاشت چندک برای اصلاح اریبی از پکیج qmap موجود در نرم‌افزار R استفاده شده است. در این نرم‌افزار بسته qmap به روش‌های متفاوت نگاشت چندک را انجام می‌دهد. از این روش‌ها می‌توان به روش تبدیل پارامتری (PTF)^۱، (DIST)^۲، (SSPLIN)^۳، (QUANT)^۴ و (RQUANT)^۵ اشاره کرد. از بین روش‌های ارائه‌شده روش چندک تجربی

1. Parametric transformation function
2. Distribution derived transformations
3. Smoothing spline
4. Empirical quantiles
5. Robust empirical quantiles

عدد باشد، یک تناسب کامل منفی را نشان می‌دهد و در صورتی که این مقدار نزدیک به صفر یا خود صفر باشد، ضریب همبستگی خطی وجود ندارد یا ضعیف است.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{si} - \bar{P}_s)(P_{oi} - \bar{P}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{si} - \bar{P}_s)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{oi} - \bar{P}_o)^2}} \quad (8)$$

که در آن \bar{P}_s میانگین بارش داده‌های ماهواره‌ای و \bar{P}_o میانگین داده‌های بارش مشاهداتی برای N روز بارانی است.

نتایج و بحث

تحقیق حاضر برای بررسی دقت بارش ماهواره‌ای در تخمین بارش‌های سیلابی انجام شده است. در همین راستا نتایج سه محصول ماهواره‌ای PDIR، PERSIANN-CCS، Now و GPM در مقیاس‌های زمانی ماهانه، روزانه و شش‌ساعته در حوضه آبریز سد یامچی مورد ارزیابی قرار گرفت. میانگین شاخص‌های آماری شامل متوسط بارش و انحراف معیار و ضریب تغییرات در مدت یازده سال در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این منطقه متوسط بارش برای ماه‌های April، March و May طی یازده سال به ترتیب برابر ۴۴/۶۰، ۵۴/۹۱ و ۵۰/۰۵ است که این مقادیر در مقایسه با ماه‌های دیگر بیشتر است. همچنین، انحراف معیار در این ماه‌ها نیز به ترتیب دارای بیشترین میانگین انحراف معیار با مقادیر ۱/۴۰، ۱/۹۰ و ۲/۰۵ هستند. همچنین، با بررسی سوابق و آمار سیل در شهرستان نیر در استان اردبیل طی دوره یازده‌ساله این نتیجه حاصل می‌شود که در این شهرستان در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ در ماه فروردین سیلاب‌هایی به وقوع پیوسته است که این سیلاب‌ها خسارت ۴۰ میلیارد ریالی به بخش کشاورزی و زراعت و خاک، ۷ میلیارد ریال خسارت به ابنیه، تأسیسات شهری و برخی از پل‌های روستایی در شهرستان نیر وارد کرده است. بنابراین، در این تحقیق بر اساس شاخص‌های آماری، سه ماه سیلابی فروردین، اردیبهشت و خرداد برای مقایسه مدل‌های بارش ماهواره‌ای استفاده شده است. شکل ۳ نمودار هیستوگرام بارش از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰ برای سه ماه فروردین، اردیبهشت و خرداد را نشان می‌دهد.

است در حالی که بایاس مثبت نشان‌دهنده تخمین بیش از حد است.

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{si} - P_{oi})}{N} \quad (3)$$

که در آن P_{si} مقدار بارش ماهواره‌ای و P_{oi} مقدار بارش زمینی در ایستگاه‌های هواشناسی و N تعداد روزهای بارانی است. $Mbias^1$ (معادله ۴) عبارت است از: نسبت داده‌های ماهواره‌ای بارش به داده‌های مشاهداتی که در بهترین حالت $Mbias$ برابر یک تخمین زده می‌شود، در حالی که تخمین کم نشان‌دهنده $Mbias$ منفی و برعکس است.

$$Mbias = \frac{\sum_{i=1}^N P_{si}}{\sum_{i=1}^N P_{oi}} \quad (4)$$

بایاس نسبی $Rbias^2$ (معادله ۵) انحراف سیستماتیک بارش مبتنی بر ماهواره را توضیح می‌دهد و مانند $Bias$ عمل می‌کند.

$$Rbias = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{si} - P_{oi})}{\sum_{i=1}^N P_{oi}} * 100\% \quad (5)$$

خطای میانگین مطلق MAE^3 با استفاده از رابطه ۶ برای نشان دادن مقدار میانگین خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_{si} - P_{oi}|}{N} \quad (6)$$

خطای جذر میانگین ریشه $RMSE^4$ با به‌کارگیری رابطه ۷ به خطاهای بزرگ‌تر نسبت داده می‌شود و برای محاسبه میانگین بزرگ خطا استفاده می‌شود.

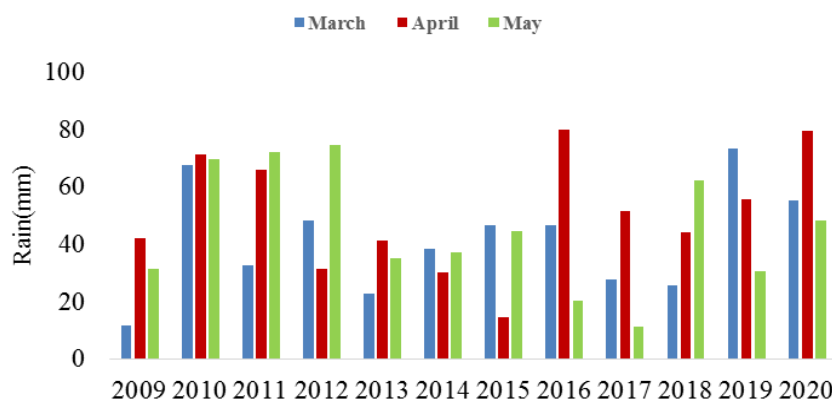
$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{si} - P_{oi})^2}{N}} \quad (7)$$

ضریب همبستگی CC برای ارزیابی میزان همبستگی بین بارش‌های ماهواره‌ای و داده‌های مشاهداتی قرار می‌گیرد و از رابطه ۸ به دست می‌آید. مقدار ضریب همبستگی بین یک و منفی یک $(-1 < CC < +1)$ قرار می‌گیرد که حالت $+1$ یک تناسب کامل مثبت را نشان می‌دهد، در حالی که زمانی که نزدیک به (-1) یا خود آن

1. Multiplicative bias
2. Relative bias
3. Mean absolute error
4. root mean square error

جدول ۱. میانگین معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای انتخاب ماههای سیلابی از ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰

Month	متوسط بارش	انحراف معیار	ضریب تغییرات
January	۳۰/۰۵	۱/۹۷	۱۵/۲۵
February	۳۶/۱۵	۱/۲۹	۲۸/۰۲
March	۴۴/۶۰	۱/۳۹	۳۲/۰۸
April	۵۴/۹۱	۱/۸۳	۳۰
May	۵۰/۰۵	۲/۰۵	۲۴/۴۱
June	۱۹/۴۲	۱/۲۲	۱۵/۹۱
July	۸/۶۷	۱/۱۶	۷/۴۷
August	۹/۷۸	۱	۹/۷۸
September	۱۸/۳۳	۱/۳۳	۱۳/۷۸
October	۳۶/۰۹	۲/۰۴	۱۷/۶۹
November	۳۵/۰۷	۱/۹۶	۱۷/۸۹
December	۲۵/۸۲	۱/۷۵	۱۴/۷۵

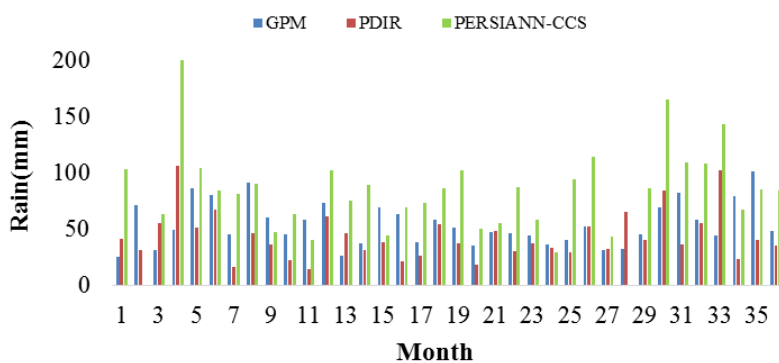


شکل ۳. نمودار بارش ماهانه در ماههای سیلابی منطقه مطالعه شده از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰

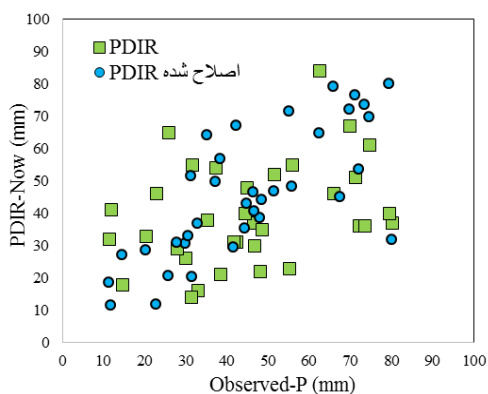
در مقیاس ماهانه برای ایستگاه سینوپتیک نیر بیشترین ضریب همبستگی برای مدل GPM نسبت به داده‌های مشاهداتی به ثبت رسیده است. همچنین، مقادیر $Mbias(1/18)$ ، $Bias(2/72)$ و $Rbias(5/96)$ درصد نشان می‌دهد مدل GPM بارش منطقه را نسبت به داده‌های واقعی بیشتر تخمین زده است. از طرف دیگر، برای مدل PERSIANN-CCS و PDIR-Now مقادیر شاخص‌های $Mbias$ ، $Bias$ و $Rbias$ به ترتیب $(1/94)$ ، $(18/52)$ و $(40/58)$ ، $(0/94)$ ، $(-2/02)$ و $(-4/44)$ است که نشان می‌دهد این دو ماهواره هر یک بارش منطقه را نسبت به داده‌های واقعی به ترتیب بیشتر و کمتر تخمین زده‌اند. همچنین، با توجه به شکل ۶ مدل GPM بهترین نتایج را برای MAE، RMSE و CC نسبت به دیگر مدل به دست آورده است.

مقایسه داده‌های بارش ماهواره‌ای در مقیاس ماهانه

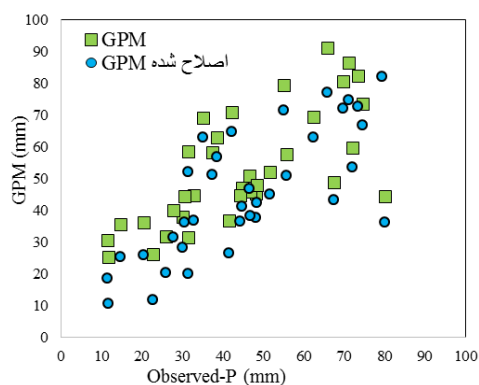
شکل ۴ نشان‌دهنده مقدار متوسط بارش ماهانه در ماه‌های سیلابی انتخاب شده در مدت ۱۱ سال برای سه محصول ماهواره‌ای است. همچنین، شکل ۵ نشان‌دهنده میانگین بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CCS، PDIR-Now و GPM نسبت به داده‌های برداشت شده در ایستگاه سینوپتیک منطقه است. با توجه به ارزیابی‌های انجام شده، مقادیر میانگین شاخص‌های ارزیابی برای داده‌های ماهانه قبل و بعد از اصلاح در جدول ۲ آورده شده است. با بررسی داده‌های بارش ماهواره‌ای با داده‌های بارش ایستگاه سینوپتیک منطقه در مقیاس ماهانه این نتیجه حاصل می‌شود که عملکرد مدل GPM نسبت به مدل PERSIANN-CCS و PDIR-Now به مراتب بهتر است.



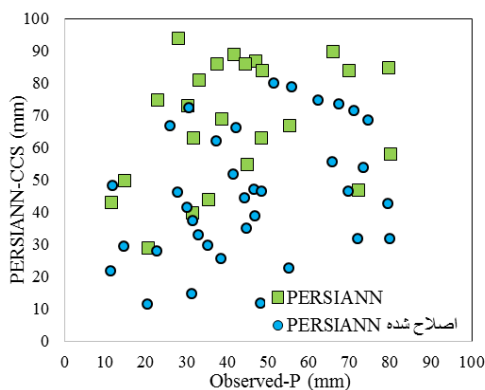
شکل ۴. مقدار متوسط بارش روزانه در سه محصول ماهواره‌ای در ماه‌های سیلابی



(ب)



(الف)

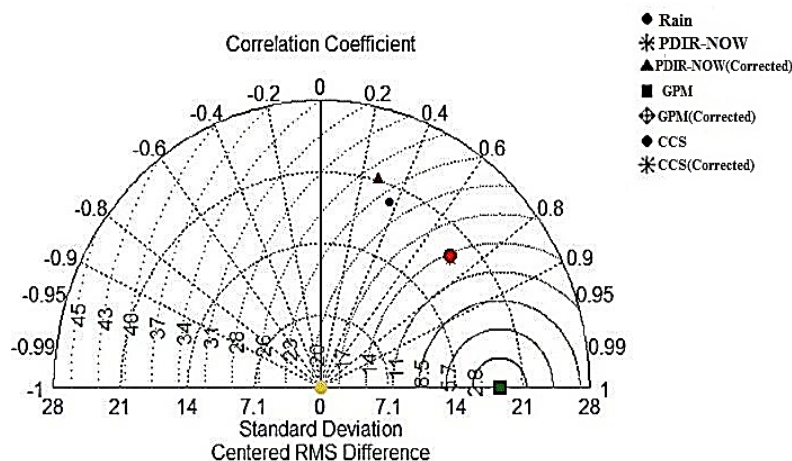


(ج)

شکل ۵. مقایسه داده‌های ایستگاه سینوپتیک نیر با میانگین بارش ماهواره‌ای (الف) GPM، (ب) PDIR-Now و (ج) PERSIANN-CCS

جدول ۲. میانگین معیارهای ارزیابی محاسبه‌شده در مقیاس ماهانه در ایستگاه‌های مورد بررسی

شاخص	NSE	RMSE	MAE	RBIAS	MBIAS	BIAS	CC
قبل از اصلاح	PERSIANN-CCS	-۱۳	۶۱/۲۶	۱۹/۹۰	٪۴۰/۵۸	۱/۹۴	۰/۲۳
	PDIR-Now	-۰/۶	۱۳/۵۲	۷/۰۹	-٪۴/۴۴	۰/۹۴	۰/۲۷
	GPM	۰/۳	۹/۷۰	۴/۶۶	٪۵/۹۶	۲/۷۲	۰/۷۴
بعد از اصلاح	PERSIANN-CCS	-۰/۳	۱۲/۸۲	۵/۷۲	-٪۳/۷۶	۰/۹۹	۰/۳۴
	PDIR-Now	۰/۴۸	۸/۰۴	۳/۷۹	٪۰/۱	۰/۹۹	۰/۷۴
	GPM	۰/۵۱	۸/۰۴	۳/۸۰	٪۰/۱۰	-۰/۵۴	۰/۷۵



شکل ۶. دیاگرام تیلور پیش‌بینی خام و پس‌پردازش‌شده بارش در مقایسه با مقادیر ایستگاه سینوپتیک نیر

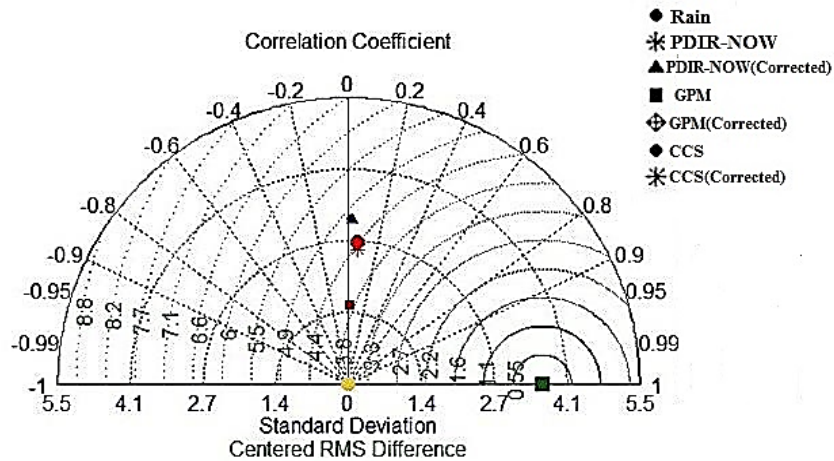
بارش را برای منطقه بیشتر تخمین زده است. Liang و همکاران (۲۰۱۲) به ارزیابی دو مدل بارشی TRMM و CMORPH پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد این دو مدل مقدار بارش را برای منطقه را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده است [۳۳]. جوانمرد و همکاران (۲۰۱۰) با ارزیابی مدل TRMM با داده‌های بارش واقعی به این نتیجه دست یافتند که این مدل حدود ۲۵ درصد مقدار بارش کشور را کمتر تخمین زده است [۵].

اما برای ضریب همبستگی دو مدل بارش PDIR-Now و GPM از ضریب همبستگی قابل قبولی برخوردار است که نتایج تحقیقات در جهان و ایران نیز آن را تأیید می‌کنند. به عنوان مثال، Xie و همکاران (۲۰۰۷) برای دو مدل بارش TRMM و PERSIANN نیز همبستگی بین ۰/۴ و ۰/۶ را گزارش کردند [۳]. نتایج پژوهش Wang و همکاران (۲۰۱۷) نیز بیانگر آن بود که بارش‌های ماهواره‌ای GPM در مقایسه با سایر مدل‌ها از ضریب همبستگی بالاتری برخوردار است [۱۴].

مقایسه داده‌های بارش ماهواره‌ای در مقیاس روزانه مقایسه داده‌های بارش PERSIANN-CCS، PDIR و GPM در مقیاس روزانه نشان می‌دهد داده‌های GPM بیشترین ضریب همبستگی را با داده‌های ایستگاه سینوپتیک منطقه دارند. نتایج آماری به دست آمده برای داده‌های روزانه در جدول ۳ و دیاگرام تیلور خام و پس‌پردازش‌شده نیز در شکل ۷ نشان ارائه شده است. نتایج به دست آمده برای خطای RMSE، MAE، Bias و Rbias در مقیاس روزانه، نشان از برتری ماهواره GPM بر PDIR-Now و PERSIANN-CCS دارد. به طور کلی، دو مدل GPM و PDIR-Now بارش منطقه را در مقیاس روزانه کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند و مدل PERSIANN-CCS این مقدار را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده است. این در حالی است که برای تحقیقات مختلف در سطح جهان و ایران این نتایج در برخی از موارد متفاوت است. به عنوان مثال، Kizza و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل TRMM و PERSIANN و مقایسه آن‌ها با یکدیگر به این نتیجه دست یافتند که این دو مدل میزان

جدول ۳. میانگین معیارهای ارزیابی محاسبه‌شده در مقیاس روزانه در ایستگاه‌های مورد بررسی

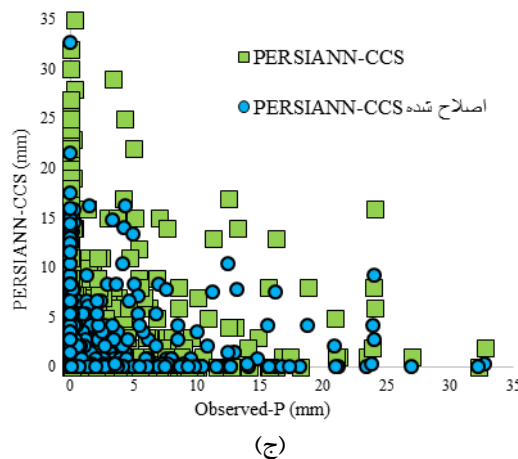
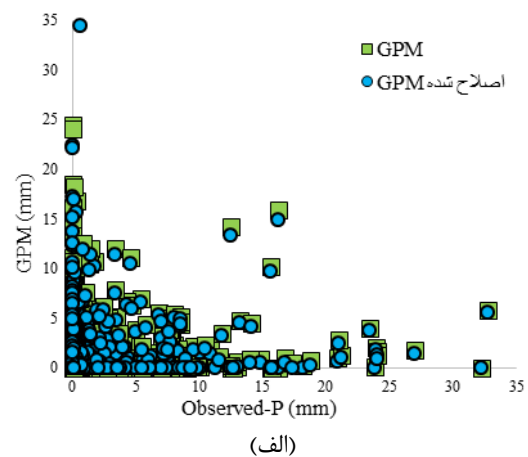
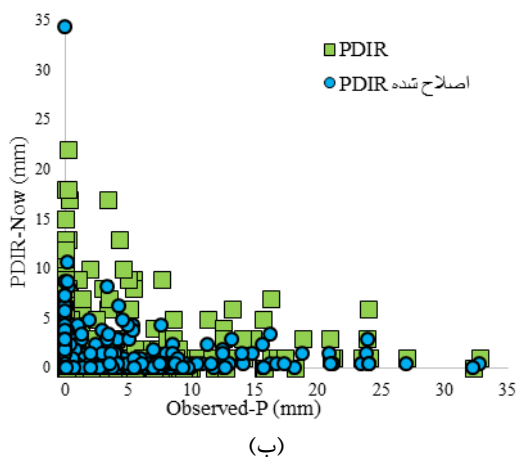
CC	BIAS	MBIAS	RBIAS	MAE	RMSE	NSE	شاخص
-۰/۰۰۱	۱/۷۰	۲/۱۵	۱۱۵/۷۹	۳/۸۲	۱۱/۷۱	-۹/۳۲	PERSIANN-CCS
۰/۰۱	-۰/۰۵	۰/۹۴	-۳/۵۲	۲/۲۷	۴/۷۸	-۰/۷۰	PDIR
۰/۰۶	-۰/۰۹	۰/۹۳	-۶/۲۳	۲/۱۹	۴/۴۲	-۰/۴۶	GPM
۰/۰۰۸	-۰/۰۷	۰/۹۴	-۵/۳۱	۲/۳۹	۴/۸۲	-۰/۷۳	PERSIANN-CCS
۰/۰۱۳	-۰/۸۱	۰/۴۴	۳/۳۶	۱/۷۷	۴/۰۲	-۰/۲۰	PDIR
۰/۰۷	-۰/۰۰۲	۰/۹۹	-۰/۲	۲/۳۶	۴/۹۴	-۰/۵۹	GPM



شکل ۷. دیاگرام تیلور پیش‌بینی خام و پس‌پردازش‌شده بارش در مقایسه با مقادیر ایستگاه سینوپتیک نیر

همچنین، طبق شکل ۷ ضریب همبستگی در مقیاس روزانه بسیار پایین است و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد بارش در این مقیاس نیز مناسب برآورد نمی‌شود.

شکل ۸ نتایج همبستگی ایستگاه و مقادیر بارش ماهواره‌ای را در مقیاس روزانه طی دوره آماری ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده بیشترین ضریب همبستگی برای ماهواره GPM بوده است.



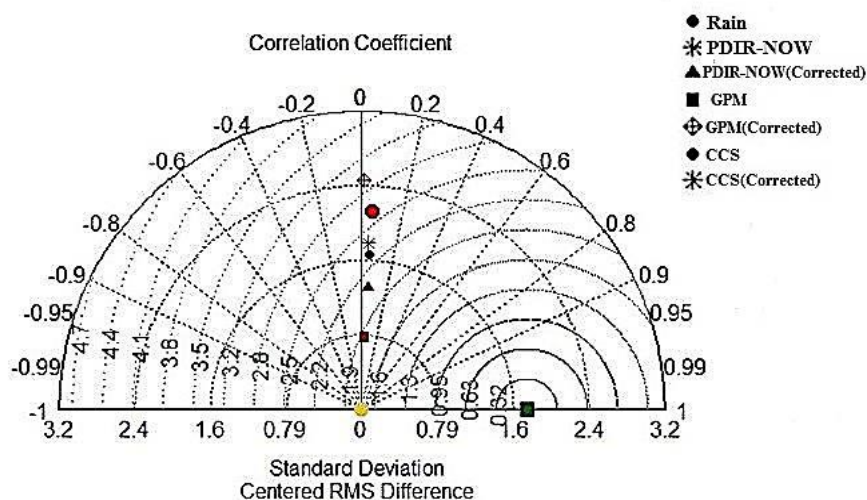
شکل ۸. مقایسه داده‌های ایستگاه سینوپتیک نیر با میانگین بارش ماهواره‌ای (الف) GPM، (ب) PDIR-Now و (ج) PERSIANN-CCS

در مقیاس ساعتی برای ایستگاه سینوپتیک نیر، بیشترین ضریب همبستگی برای مدل GPM نسبت به داده‌های مشاهداتی به ثبت رسیده است. همچنین، مقادیر Mbias (۱/۸۸)، Bias (۰/۳۲) و Rbias (۰/۴ / ۰/۸۸) نشان می‌دهد مدل GPM، PERSIANN-CCS و PDIR-Now بارش منطقه را نسبت به داده‌های واقعی بیشتر تخمین زده است. همچنین، با توجه به جدول ۴ و با توجه به شکل ۹ ماهواره GPM از عملکرد مناسبی نسبت به ماهواره‌های دیگر برخوردار است، اما به دلیل دقت کم این داده‌ها در مقیاس زمانی ساعتی، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به جای داده‌های بارش ایستگاه سینوپتیک در مقیاس ساعتی توصیه نمی‌شود.

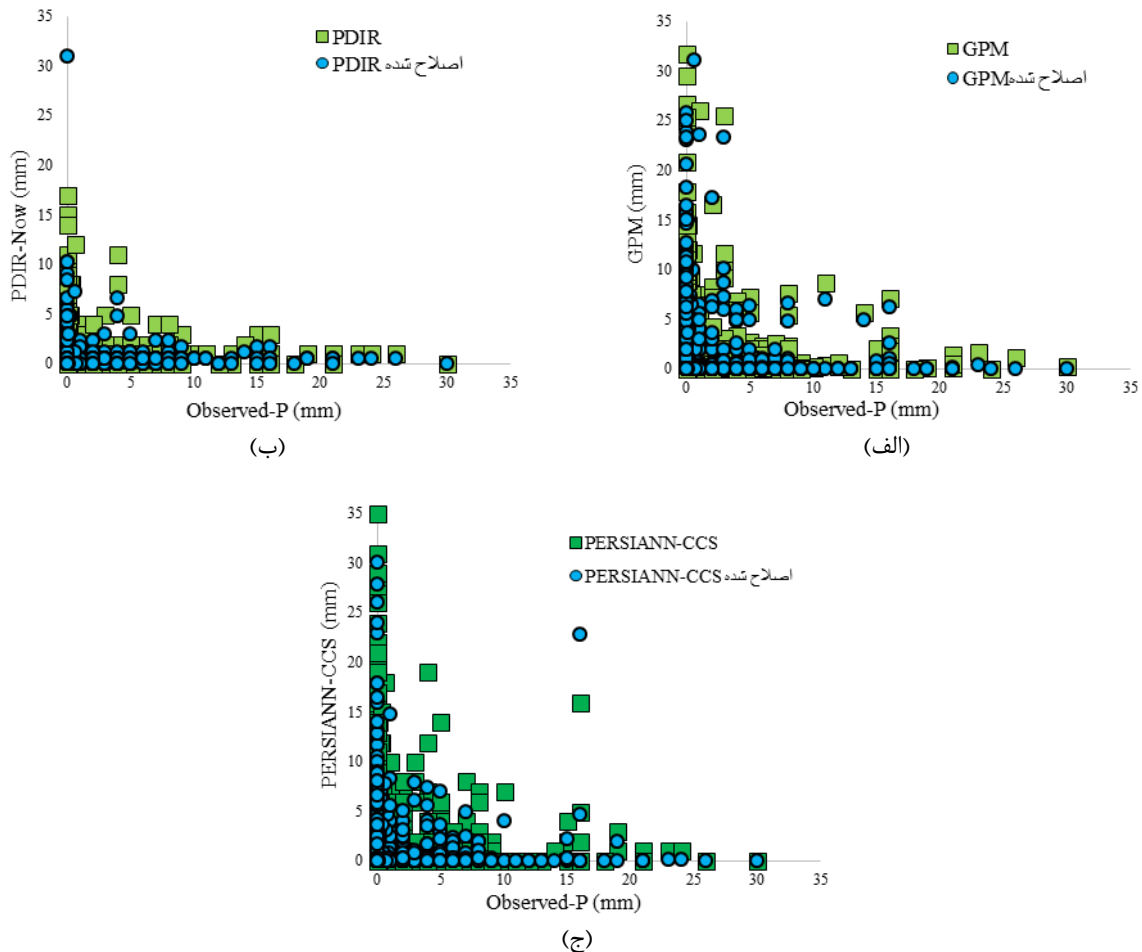
مقایسه داده‌های بارش ماهواره‌ای در مقیاس ساعتی در این پژوهش علاوه بر داده‌های روزانه و ماهانه، اقدام به ارزیابی و مقایسه داده‌های ماهواره‌ای بارش PERSIANN-CCS، PDIR و GPM در مقیاس شش‌ساعته با داده‌های بارش ایستگاه سینوپتیک منطقه پرداخته شده و میانگین شاخص‌های آماری محاسبه شده در جدول ۴ قبل و بعد از اصلاح ارائه شده است. همچنین در شکل ۹ دیاگرام تیلور پیش‌بینی خام و پس‌پردازش‌شده بارش در مقایسه با مقادیر ایستگاه سینوپتیک نیر نشان داده شده است. شکل ۱۰ نیز نشان‌دهنده میانگین بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CCS، PDIR-Now و GPM نسبت به داده‌های مشاهداتی است.

جدول ۴. میانگین معیارهای ارزیابی محاسبه شده در مقیاس ساعتی در ایستگاه‌های مورد بررسی

شاخص	NSE	RMSE	MAE	RBIAS	MBIAS	BIAS	CC
قبل از اصلاح							
PERSIANN-CCS	-۱/۹۰	۲/۹۲	۰/۹۷	٪۹۸/۸۳	۱/۹۸	-۰/۳۶	۰/۰۴۳
PDIR-Now	-۰/۴۹	۲/۱۰	۰/۷۷	٪۴۶/۴۵	۱/۴۶	-۰/۱۷	۰/۰۴۷
GPM	-۱/۳۹	۲/۶۶	۰/۹۱	٪۸۸/۰۴	۱/۸۸	-۰/۳۲	۰/۰۵
بعد از اصلاح							
PERSIANN-CCS	-۰/۸۱	۲/۳۱	۰/۶۶	-٪۱/۱۱	۰/۹۸	-۰/۰۰۴	۰/۰۴۴
PDIR-Now	-۰/۱۵	۱/۸۵	۰/۵۸	-٪۱۹/۴۷	۰/۸۰	-۰/۰۷	۰/۰۴۳
GPM	-۰/۱۶	۲/۱۷	۰/۶۲	-٪۹/۵۲	۰/۹	-۰/۰۳	۰/۰۴



شکل ۹. دیاگرام تیلور پیش‌بینی خام و پس‌پردازش‌شده بارش در مقایسه با مقادیر ایستگاه سینوپتیک نیر



شکل ۱۰. مقایسه داده‌های ایستگاه سینوپتیک نیر با میانگین بارش ماهواره‌ای الف) GPM، ب) PDIR-Now و ج) PERSIANN-CCS

نتیجه‌گیری

تخمین قابل اطمینان و تعیین مقدار بارش برای کاربردهای هیدرولوژیکی لازم و ضروری است. با این حال، تخمین بارش از لحاظ مکانی و زمانی، از چالش‌برانگیزترین مسائلی است که کشورهای در حال توسعه مانند ایران با آن درگیر هستند. بنابراین، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بارش یکی از راهکارهای مناسب برای حل این چالش است. در مقاله حاضر، به ارزیابی دقت داده‌های ماهواره‌ای بارش و اطلاعات بارندگی ایستگاه سینوپتیک نیر استان اردبیل در یک دوره یازده‌ساله مربوط به سال‌های آبی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰ در مقیاس‌های زمانی ماهانه، روزانه و ساعتی پرداخته شد. با بررسی نتایج به دست آمده از شاخص‌های آماری R_{bias} و MB_{bias} می‌توان نتیجه گرفت که در مقیاس ماهانه و ساعتی هر سه مدل بارش مقدار بارش را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده است. در مقیاس

روزانه مدل بارش PERSIANN-CC میزان بارش را بیشتر و دو مدل دیگر GPM و PDIR-NOW میزان بارش را کمتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد می‌کند. اعتبارسنجی داده‌های بارش ماهواره‌ای با استفاده از معیارهای $RMSE$ ، MAE و CC نشان داد در مقیاس ماهانه ماهواره GPM به ترتیب ۹/۷۰، ۴/۶۶ و ۰/۷ و در مقیاس روزانه هم این مدل بارش با ضرایب آماری ۴/۴۲، ۲/۱۹ و ۰/۰۶ نسبت به دو مدل بارش دیگر برتری داشته باشد؛ اما در مقیاس ساعتی ماهواره PDIR-NOW با شاخص‌های آماری ۱/۹۹، ۰/۶۹ و ۰/۰۵ از عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار باشد. اما با توجه به اینکه در مقیاس روزانه و ساعتی میزان شاخص‌های آماری به مراتب پایین بوده است، استفاده از این داده‌ها در مقیاس روزانه و ساعتی توصیه نمی‌شوند، ولی در مقیاس زمانی ماهانه دقت قابل قبول دارند.

منابع

- [1]. Mianabadi A, Alizadeh M, Hosseini F. Statistical evaluation of CMORPH model output in precipitation estimation Northeast of Iran (Case Study: North Khorasan). *Journal of Soil (Agricultural Sciences and Industries)*. 2013; 27(5): 919-927. [Persian]
- [2]. Sharifi E, Eitzinger J, Dorigo W. Performance of the State-Of-The-Art Gridded Precipitation Products over Mountainous Terrain: A Regional Study over Austria. *Remote Sensing*. 2019; 11: 1-20.
- [3]. Xie P, Yatagai A, Chen M, Hayasaka T, Fukushima Y, Changming L, Yang S. "A Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation Over East Asia. *Journal of Hydrometeorology*. 2007; (8): 607-626.
- [4]. Hong YD, Gochis JT, Cheng KL, Sorooshian S. Evaluation of PERSIANN CCS rainfall measurement using the NAME event rain gauge network. *Journal of Hydrometeorol*. 2007; 8(3): 469-482.
- [5]. Javanmard S, Yatagai A, Nodzu MI, BodaghJamali J, Kawamoto H. Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Iran. *Adv. Geosci*. 2010; (25): 119-125. [Persian]
- [6]. Beighley RE, Ray RL, Lee H, Schaller L, Andreadis K, Durand M, et al. Comparing satellite derived precipitation datasets using the Hillslope River Routing (HRR) model in the Congo River Basin. *Hydrological Processes*. 2011; 25(20): 3216-3229. [Persian]
- [7]. Cai X, Zou S, Wang W, Xu B. Evaluation of TRMM precipitation data over the Inland River Basins of Northwest China. *Geomatics for Integrated Water Resources Management (GIWRM)*. International Symposium, Lanzhou Jiaotong University, Gansu, China. 2012.
- [8]. HejazyZadeh A, Alijani B, Ziaeian P, Karimi M, Rafati S. Evaluation of satellite rainfall Mqadyrhasl 3B43 and comparison with Kriging interpolation technique. *GIS remote sensing of Iran*. 2012; 4(3): 64-49. [Persian]
- [9]. Kizza M, Westerberg I, Rodhe A, Ntale HK. Estimating areal rainfall over Lake Victoria and its basin using ground-based and satellite data. *Journal of Hydrology*. 2012; 464:401-411.
- [10]. Chen Y, Ebert EE, Walsh KJ, Davidson NE. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates of tropical cyclone rainfall using PACRAIN data. *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2013; 118(5): 2184-2196.
- [11]. MianaBad A, Alizadeh A, Banayanaval M, Faridhosseini A. Statistical evaluation of the model for estimating precipitation CMORPH North East of Iran (Case study: Northern Khorasan). *Journal of Soil and Water*. 2013; 27(5): 927-919. [Persian]
- [12]. Shirvani A, Fkharizadeh Shirazi A. Comparison of the observed precipitation and TRMM satellite estimates in Fars province. *Journal of Agricultural Meteorology*. 2014; 2(2): 15-1. [Persian]
- [13]. Moazami S, Golian S, Hong Y, Sheng C, Kavianpour M R. Comprehensive evaluation of four highresolution satellite precipitation products over diverse climate conditions in Iran. *Hydrol. Sci. J*. 2014; 61(2): 420-440. [Persian]
- [14]. Wang Z, Zhong R, Lai CH, Chen J. Evaluation of the GPM IMERG Satellite- Based Precipitation Products and the Hydrological Utility, *Atmospheric Research*. 2017; (196): 151-163.
- [15]. Hosseini-Moghari S M, Araghinejad S, Ebrahimi K. Spatio-temporal evaluation of global gridded precipitation datasets across Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 2018; 63(11): 1669-1688.[Persian]
- [16]. Parisooj P, Goharnejad H, Moazami S. Rainfall-Runoff Hydrologic Simulation Using Adjusted Satellite Rainfall Algorithms, a Case Study: Voshmgir Dam Basin. *Golestan. Iran-Water Resources Research*. 2018; 14(3): 140-159.[Persian]
- [17]. Shayeghi A, Azizian A, Brocca L. The Reliability of Reanalysis and Remotely Sensed Precipitation Products for Hydrological Simulation over the SRB, Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 2020; 65(2): 296-310.[Persian]
- [18]. Koochi S, Azizian A, Brocca L. Calibration of VIC-3L Hydrological Model using Satellite Based Surface Soil Moisture Datasets. *Iran-Water Resources Research*. 2020; 15(4): 55-67. [Persian]
- [19]. Ahmadi M, Dadashi AA, Deyrmajai A. Runoff Estimation Using the IHACRES Model Based on CHIRPS Satellite Data and CMIP5 Models (Case Study: Gorganroud Basin- Aq Qala Area). *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 2019; 51(3): 659-671. [Persian]
- [20]. Mahrooghy M, Anantharaj VG, Younan NH, Aanstoos J, Hsu KL. On an Enhanced FARSICC Algorithm for Precipitation Estimation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2012; 29(7): 922-932.[Persian]

- [21]. Nguyen P, Shearer EJ, Ombadi M, Goroo VA, Hsu K, Sorooshian S, et al. PERSIANN Dynamic Infrared Rain Rate Model (PDIR) for High-Resolution, Real-Time Satellite Precipitation Estimation. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2020; 101(3): 286-302.
- [22]. Kummerow C, Barnes W, Kozu T, Shiue J, Simpson J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1998; 15(3): 809- 717.
- [23]. Huffman G, Bolvin DT, Braithwaite D, Hsu K, Joyce R. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 4, 5: For the NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite E Retrievals for GPM (IMERG), GPM Project. 2015.
- [24]. Wu L, Seo DJ, Demargne J, Brown JD, Cong S, Schaake J. Generation of ensemble precipitation forecast from single-valued quantitative precipitation forecast for hydrologic ensemble prediction. *Journal of Hydrology*. 2011; 399 (3–4): 281–298.
- [25]. Teutschbein C, Seibert J. Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: A review of recent modeling strategies. 2010; 4(7): 834-860.
- [26]. Zollo A L, Rianna G, Mercogliano P, Tommasi P, Comegna L. Validation of a simulation chain to assess climate change impact on precipitation induced landslides. In *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. 2014; (1): 29-287.
- [27]. Teutschbein C, Seibert J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*. 2012; (457): 12–29.
- [28]. Boé J, Terray L, Habets F, Martin E. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*. 2007; 27(12): 1643–1655.
- [29]. Piani C, Weedon GP, Best M, Gomes SM, Viterbo P, Hagemann S, Haerter JO. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*. 2010; 395 (3–4): 199–215.
- [30]. Bum-Kim K, Kwon HH, Han D. Precipitation ensembles conforming to natural variations derived from a regional climate model using a new bias correction scheme. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016; 20(5): 2019– 2034.
- [31]. Gudmundsson L, Bremnes JB, Haugen JE, Engen-Skaugen T. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations; a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012; 16(9): 3383–3390.
- [32]. Gudmundsson L. qmap: Statistical transformations for post-processing climate model output. R package version 1.0.3. 2014.
- [33]. Liang S, Li X, Wang J. 2nd Edition. *Advanced remote sensing: terrestrial information extraction and applications*, Academic Press; 2020: 800.