تصحیح اریبی محصول بارش ماهواره‌ای GPM-IMERG V07 Final Run در شمال‌غرب ایران

چکیده

محصولات بارش ماهواره‌ای منبع مهمی برای پایش بارش در مناطقی با پوشش محدود ایستگاه‌های زمینی هستند؛ بااین‌حال، عملکرد آن‌ها می‌تواند تحت تأثیر شدت بارش، تغییرات زمانی و شرایط توپوگرافی قرار گیرد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی GPM-IMERG V07 Final Run و توسعه چارچوبی منطقه‌ای برای تصحیح اریبی آن در شمال‌غرب ایران انجام شد. به این منظور، برآوردهای روزانه IMERG طی دوره سه ساله - اول ژانویه ۲۰۲۱ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۳ - با مشاهدات ۱۸۸ ایستگاه باران‌سنجی مقایسه شدند. ساختار خطا در مقیاس‌های ماهانه و فصلی و در طبقات مختلف شدت بارش و ارتفاع بررسی و بر اساس الگوهای شناسایی‌شده، روابط تصحیح افزایشی، ضربی و ترکیبی متناسب با زمان، شدت بارش و شرایط مکانی توسعه یافتند. برآورد ضرایب و انتخاب مدل با استفاده از اعتبارسنجی متقابل مونت‌کارلو انجام شد. نتایج نشان داد که محصول خام در بازنمایی تغییرات زمانی بارش عملکرد محدودی دارد؛ به‌طوری‌که ضریب همبستگی آن 0.1659 و RMSE روزانه آن 3.7207 میلی‌متر در روز بود. پس از تصحیح، ضریب همبستگی به 0.8532 افزایش یافت، RMSE به 1.6288 میلی‌متر در روز کاهش پیدا کرد و NSE از 0.5436− به 0.7042 رسید. شاخص‌های رخداد نیز کاهش هشدارهای کاذب و بهبود تشخیص بارش را نشان دادند. میزان بهبود در طبقات شدت یکسان نبود؛ در بارش‌های متوسط و سنگین، خطای مقداری کاهش یافت و اریبی نسبی به صفر نزدیک شد، درحالی‌که تشخیص بارش‌های بسیار ضعیف همچنان با محدودیت همراه بود. تصحیح همچنین اختلاف عملکرد محصول در امتداد گرادیان ارتفاعی را کاهش داد، هرچند بخشی از خطای توپوگرافی و کم‌برآوردی پس از تصحیح باقی ماند. طبقه سیل‌آسا به دلیل کمبود نمونه تصحیح نشد و کارایی روش در این طبقه ارزیابی نشده است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند که چارچوب پیشنهادی با لحاظ‌کردن ماهیت زمان‌وابسته، شدت‌وابسته و مکان‌وابستهٔ خطا، سازگاری V07 IMERG با مشاهدات زمینی را به‌طور محسوسی افزایش داد. داده‌های تصحیح‌شده می‌توانند به‌عنوان مکمل شبکه باران‌سنجی در مطالعات هیدروکلیماتولوژیکی و هیدرولوژیکی منطقه استفاده شوند؛ هرچند اعتبارسنجی مستقل و دوره‌های زمانی طولانی‌تر برای ارزیابی تعمیم‌پذیری آن ضروری است.

واژگان کلیدی: باران سنجی GPM-IMERG V07 Final Run؛ تصحیح اریبی؛ بارش ماهواره‌ای؛ شدت بارش؛ توپوگرافی؛ شمال‌غرب ایران؛ باران‌سنجی؛ ناهمگونی مکانی.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

۱- مقدمه

بارش به‌عنوان محرک بنیادین چرخه هیدرولوژیکی، نقشی کلیدی در امنیت غذایی، پایداری اکوسیستم‌ها و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند و داده‌های با تفکیک مکانی–زمانی بالای آن برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی، پیش‌بینی سیلاب، پایش خشکسالی و تحلیل رخدادهای حدی ضروری است (Beck, Vergopolan, et al., 2017; Gebrechorkos et al., 2023; Koutsouris et al., 2016; Pourentezari et al., 2025; Scanlon et al., 2023; Seneviratne et al., 2021).

با وجود دقت بالای شبکه‌های باران‌سنجی زمینی در مقیاس نقطه‌ای، چالش‌هایی نظیر تراکم ناکافی، توزیع نامتوازن، خطاهای بادزدگی و کمبود داده در مناطق کوهستانی و صعب‌العبور، کارایی آن‌ها را در بازنمایی تغییرپذیری مکانی بارش محدود ساخته است (Habib et al., 2001; Kidd et al., 2017; Kochendorfer et al., 2017; Prakash et al., 2018; Serrano-Notivoli et al., 2018; Sevruk et al., 2009; G. Tang, Clark, Papalexiou, Ma, Hong, et al., 2020; Tapiador et al., 2017). چنین محدودیت‌هایی اغلب عدم قطعیت‌های قابل‌توجهی در برآورد منابع آب و تحلیل رخدادهای حدی ایجاد می‌کنند؛ چالشی که به‌ویژه در کشورهایی با رژیم‌های اقلیمی متنوع و توپوگرافی پیچیده، از جمله ایران، نمود بیشتری دارد (Fallah et al., 2020; Farokhnia et al., 2024; Nozarpour et al., 2024; Prakash et al., 2018; Sharifi et al., 2016).

در دهه‌های اخیر، محصولات بارش ماهواره‌ای (SPPs[1]) با پوشش پیوسته و تفکیک زمانی بالا، پایش بارش را در مناطق فاقد داده متحول کرده‌اند (Beck et al., 2019, 2020; Derin, Anagnostou, et al., 2019; Hou et al., 2014; Kidd et al., 2020; Kidd & Huffman, 2011; Kidd & Levizzani, 2011; Nakamura, 2021; Skofronick-Jackson et al., 2017; Skofronick-Jackson et al., 2018; Smith et al., 2007; W. Sun et al., 2018; Tapiador et al., 2017; J. Wang et al., 2021). با این حال، دقت این محصولات نظیر TRMM 3B42، CMORPH، PERSIANN، GSMaP، CHIRPS و MSWEP تحت تأثیر ریزفیزیک ابر، سامانه‌های همرفتی، پوشش برف و اثرات اوروگرافی متغیر بوده و هیچ محصول واحدی برتری مطلقی در تمامی شرایط فیزیوگرافی ندارد (Beck, Van Dijk, et al., 2017; Beck, Vergopolan, et al., 2017; Derin, Anagnostou, et al., 2019; Derin, Bhuiyan, et al., 2019; Kidd et al., 2021; Maggioni & Massari, 2018; Massari et al., 2017; Prakash, 2019; Q. Sun et al., 2018; G. Tang, 2020; D. Watters & Battaglia, 2021; D. C. Watters et al., 2024, 2025; Xiang et al., 2021; Yong et al., 2015, 2016).

محدودیت‌های مأموریت TRMM در پوشش عرض‌های بالا و برآورد بارش برف، منجر به راه‌اندازی مأموریت GPM با بهره‌گیری از حسگرهای DPR[2] و GMI[3] شد (Hou et al., 2014; Levizzani et al., 2020; Skofronick-Jackson et al., 2017, 2018; Tan et al., 2019; G. Tang et al., 2016; Yong et al., 2015). محصول تلفیقی این مأموریت، IMERG[4]، بارش را با تفکیک مکانی 0.1° و زمانی 30min در سه نسخه Early، Late و Final ارائه می‌دهد که نسخه Final برای مطالعات اقلیمی و هیدرولوژیکی مطلوب تر است (Huffman et al., 2015, 2023; Tan et al., 2016, 2024; G. Tang, Clark, Papalexiou, Ma, & Hong, 2020; S. Tang et al., 2021).

1- Satellite Precipitation Products

2- the Dual-frequency Precipitation Radar

3- he GPM Microwave Imager

4- Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM

ارزیابی‌های GPM-IMERG V06 نشان‌دهنده محدودیت‌های عملکردی این محصول در برآورد بارش است؛ به‌ویژه خطاهای سیستماتیک در نواحی کوهستانی، مناطق ساحلی، سطوح پوشیده از برف/یخ و همچنین دشواری در بازنمایی دقیق شدت رخدادهای حدی و بارش‌های کوتاه‌مدت، از چالش‌های اصلی این نسخه بوده است (Tan et al., 2016; G. Tang, Clark, Papalexiou, Ma, & Hong, 2020). برای رفع این چالش‌ها، ناسا در سال ۲۰۲۳ نسخه هفتم (IMERG V07) را با بازپردازش کامل سری زمانی TRMM–GPM، ارتقای الگوریتم‌های بازیابی، کالیبراسیون بین‌حسگری، بهبود تخمین بارش برف و خفیف و طبقه‌بندی بهتر سطوح ساحلی و کوهستانی منتشر کرد (Huffman et al., 2023). اگرچه ارزیابی‌های اولیه نشان‌دهنده برتری آماری، کاهش بایاس و ارتقای آشکارسازی در IMERG V07 نسبت به نسخه پیشین است، اما این بهبودها از نظر مکانی ناهمگن بوده و خطاهای قابل‌توجهی همچنان در نواحی کوهستانی، پوشیده از برف و متأثر از فرایندهای اوروگرافیک گزارش می‌شود (Guo et al., 2024; Zhu et al., 2024). به‌طور مشابه، پژوهش‌ها در شرق آسیا، استرالیا، اروپا و اقلیم‌های مدیترانه‌ای تأکید می‌کنند که حتی محصولات پیشرفته‌ای نظیر IMERG همچنان نسبت به نیروهای محرکه دینامیکی، ترمودینامیکی و توپوگرافی منطقه‌ای حساس هستند (Caracciolo et al., 2018; Leivadiotis & Psilovikos, 2025; Levizzani et al., 2020; Sungmin et al., 2017; Tapiador et al., 2017, 2020; Y. Wang et al., 2026). علاوه بر این، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله خاورمیانه و شمال آفریقا، ناهمگنی شدید مکانی بارش و غلبه رخدادهای همرفتی کوتاه‌مدت، از عوامل کلیدی تداوم خطا در داده‌های خام ماهواره‌ای باقی مانده‌اند (Ghorbanian et al., 2022; Maghsood et al., 2019; Mahdavi, 2023; Mahmoud et al., 2019; Sharifi et al., 2016)

در ایران، ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای نشان داده است که عملکرد آن‌ها به تنوع اقلیمی، پیچیدگی توپوگرافی، رژیم و شدت بارش، فصل وقوع و مقیاس زمانی وابسته است. قرارگیری ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک، وجود رشته‌کوه‌های مرتفع و سهم قابل‌توجه بارش برف، این کشور را به یکی از محیط‌های چالش‌برانگیز برای اعتبارسنجی محصولات ماهواره‌ای تبدیل کرده است (Aslami et al., 2019; Bakhtar et al., 2022; Hosseini-Moghari & Tang, 2020; Keikhosravi-Kiany & Balling Jr, 2024; Maghsood et al., 2019; Mahdavi, 2023; Sharifi et al., 2016; Taghizadeh et al., 2021). شریفی و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که دقت این محصولات در مناطق هموار و مرطوب بیشتر از نواحی کوهستانی غرب و شمال‌غرب کشور است (Sharifi et al., 2016). مقصود و همکاران (۲۰۱۹) نیز عملکرد بهتر IMERG را در مقیاس‌های ماهانه و فصلی نسبت به مقیاس روزانه گزارش کردند و اختلاف ارتفاع و بارش برف را از منابع مهم خطای این محصول در ایران دانستند (Maghsood et al., 2019). حسینی‌مغاری و تانگ (۲۰۲۰) با ارزیابی نسخه‌های V05 و V06، وابستگی عملکرد IMERG به نسخه و نوع محصول را نشان دادند (Hosseini-Moghari & Tang, 2020). در شمال‌غرب ایران، اسلمی و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی IMERG V05 در استان اردبیل دریافتند که اگرچه برآوردهای این محصول به مشاهدات زمینی نزدیک‌تر از برخی محصولات رقیب است، همچنان خطاهای منطقه‌ای قابل‌توجهی دارد (Aslami et al., 2019). بختار و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان دادند که توانایی IMERG V06 Final در بازنمایی بارش‌های شدید در ایران دارای تغییرپذیری زمانی و مکانی است (Bakhtar et al., 2022). افزون بر این، مقایسه محصولات مختلف

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

نشـان داده اسـت کـه هـیچ محصـولی در تمـام مقیاس‌هـای زمـانی و مکـانی برتـری یکسـانی نـدارد و محصـولات تلفیقـی ماننـد MSWEP و CHIRPS ممکـن اسـت در برخـی حوضـه‌ها و کاربردهـا عملکـرد بهتـری ارائـه دهنـد (Farokhnia et al., 2024; Ghorbanian et al., 2022). در مجمـوع، ایـن شـواهد ضـرورت ارزیـابی و تصـحیح منطقه‌ای IMERG را، به‌ویژه در مناطق کوهستانی و ناهمگن ایران، تأیید می‌کنند.

با وجـود پیشـرفت‌های اخیـر در IMERG، بیشـتر مطالعـات مرورشـده در ایـران بـه نسـخه‌های پیشـین ایـن محصـول پرداخته‌انـد و شـواهد دربـاره عملکـرد IMERG V07 در شـمال‌غرب ایـران همچنـان محـدود اسـت. ازایـن‌رو، ارزیـابی ایـن نسـخه و بررسـی روابـط تصـحیح منطقـه‌ای در محیطـی بـا نـاهمگنی توپـوگرافی و اقلـیم نیمه‌خشـک اهمیت دارد. بررسـی سـاختار خطـا و حـدود کـارایی تصـحیح می‌توانـد بـه شـناخت بهتـر قابلیت‌هـا و محـدودیت‌های داده‌هـای مـاهواره‌ای بـرای مطالعـات هیـدرولوژیکی کمـک کنـد. (Bakhtar et al., 2022; Gheysouri, Kavian, et al., 2025; Hosseini-Moghari & Tang, 2020; Keikhosravi-Kiany & Balling Jr, 2024; Najafi et al., 2025).

تصـحیح اریبـی یـک گـام پیش‌پردازشـی اساسـی بـرای محصـولات مـاهواره‌ای اسـت. در میـان روش‌هـای موجـود، رویکردهای آماری کلاسـیک بـه دلیـل سـادگی اجـرا، نیـاز حـداقلی بـه داده‌هـای آموزشـی، هزینـه محاسـباتی پـایین و تفسـیرپذیری بـالا، همچنـان بـه‌طور گسـترده مـورد اسـتفاده قـرار می‌گیرنـد (Andari et al., 2024; Benkirane et al., 2023; Elsebaie et al., 2025; Jauhari & Suhartanto, 2025; Kawo et al., 2021; Liu et al., 2022; Lufira et al., 2026; W. Wang et al., 2024). در زمینـه کـاربرد ایـن رویکردهـا بـرای محصـولات IMERG، مـروج (۲۰۲۰) بـه اعتبارسـنجی زمینـی و تصـحیح اریبـی محصـول GPM-IMERG V6 در سـوئد پرداخته است (Moravej, 2020).

روش‌های سـاده تصـحیح اریبـی، ماننـد تصـحیح اریبـی نسـبتی[5]، عمـدتاً میـانگین بلندمـدت را تعـدیل می‌کننـد و در بازسـازی توزیـع آمـاری و رخـدادهای حـدی محـدودیت دارنـد (Jauhari & Suhartanto, 2025; Yeggina et al., 2020). در مقابـل، روش‌هـای توزیع‌مبنـا، از جملـه نگاشـت چنـدکی[6] و نگاشـت مبتنـی بـر تـابع توزیـع تجمعـی[7]، در کـاهش اریبـی و RMSE محصـولات GPM-IMERG، بـه‌ویژه در منـاطق کوهسـتانی و نیمه‌خشـک، مـؤثر بوده‌انـد (Andari et al., 2024; Cannon et al., 2015; Themeßl et al., 2011). روش‌هـایی نظیـر PDF Matching[8]، Delta Mapping و Local Intensity Scaling نیـز بـرای اصـلاح شـدت بـارش و فراوانـی روزهـای بـارانی بـه‌کار رفته‌انـد (Da Silva et al., 2021; Nguyen et al., 2024; Wei et al., 2022). افـزون بـر ایـن، الگوریتم‌هـای یـادگیری ماشـین، ماننـد جنگـل تصـادفی[9]، XGBoost[10]، SVM[11] و ANN[12]، در کنـار مـدل‌های یـادگیری عمیـق ماننـد CNN[13] و LSTM[14]، قابلیـت بازنمـایی روابـط غیرخطـی میـان خطـای مـاهواره‌ای و عوامـل مکـانی–اقلیمـی

5- Ratio Bias Correction
6- Quantile Mapping
7- CDF (Cumulative Distribution Function) Mapping
8- Probability Density Function Matching
9- Random Forest
10- Extreme Gradient Boosting
11- Support Vector Machine
12- Artificial Neural Network
13- Convolutional Neural Networks
14- Long Short-Term Memory

را نشان داده‌اند (Amell et al., 2025; Baig et al., 2025; Bhuiyan et al., 2020; Gan et al., 2026; Kim et al., 2022; Saghiry et al., 2025; L. Wang et al., 2023; Yang et al., 2022). بااین‌حال، نیاز این روش‌ها به داده‌های آموزشی طولانی، منابع محاسباتی بیشتر و تفسیرپذیری محدود، روش‌های آماری را به گزینه‌ای عملی‌تر برای تصحیح اریبی در مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی، از جمله شمال‌غرب ایران، تبدیل می‌کند.

پیچیدگی توپوگرافی و تنوع سامانه‌های بارشی در شمال‌غرب ایران، همراه با وابستگی منابع آب و کشاورزی به بارش، دستیابی به برآوردهای دقیق را ضروری می‌سازد؛ زیرا اریبی سیستماتیک می‌تواند پیش‌بینی سیلاب، پایش خشکسالی و مدیریت منابع آب را تحت تأثیر قرار دهد. با وجود پیشرفت محصولات GPM-IMERG، عملکرد نسخه Final Run V07 و تصحیح اریبی آن در این منطقه کمتر بررسی شده است. همچنین، مطالعات پیشین عمدتاً بر نسخه‌های قدیمی‌تر یا فرض ایستایی خطا متمرکز بوده‌اند، درحالی‌که اریبی ماهواره‌ای با فصل، شدت بارش، ارتفاع و ویژگی‌های فیزیوگرافی تغییر می‌کند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و تصحیح اریبی محصول GPM-IMERG Final Run V07 در شمال‌غرب ایران انجام شده است. در این مطالعه، روابط تصحیح به تفکیک ماه و شدت بارش بررسی می‌شوند و نقش طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع در آن‌ها ارزیابی می‌شود. سهم پژوهش، کاربرد و ارزیابی منطقه‌ای رویکردهای تصحیح آماری در شرایط کوهستانی و نیمه‌خشک شمال‌غرب ایران و بررسی مؤلفه‌های مکانی و ارتفاعی مؤثر بر این روابط است.

۲- داده ها و روش‌ها

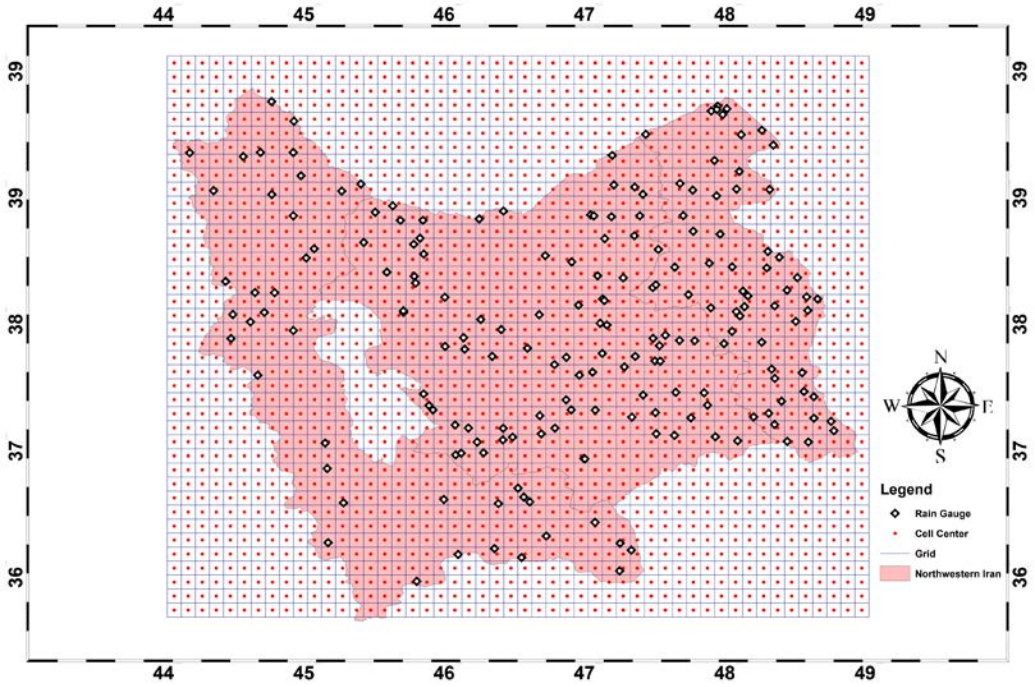
منطقه مطالعه سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و اردبیل را دربر می‌گیرد؛ ارتفاع منطقه از ۴۴ تا ۴۸۱۱ متر تغییر می‌کند و میانگین بارش سالانه حدود ۳۴۷ میلی‌متر است. داده مرجع شامل بارش روزانه ۱۸۸ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشور در دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۳ بود (شکل ۱). داده‌های مفقود[15]، غیرواقعی[16] و ناسازگار کنترل و ایستگاه‌های دارای بیش از ۱۰ درصد داده مفقود یا پوشش زمانی ناکافی حذف شدند. از مجموع ۲۰۷ ایستگاه اولیه، ۱۹ ایستگاه به دلیل نداشتن معیارهای پوشش زمانی یا کیفیت داده کنار گذاشته شدند و ۱۸۸ ایستگاه در تحلیل نهایی باقی ماندند.

برای انطباق زمانی، برآوردهای ۳۰ دقیقه‌ای IMERG از ساعت 06 UTC هر روز تا 06 UTC روز بعد تجمیع شدند. از آنجا که مقایسه IMERG و مشاهدات زمینی در مقیاس روزانه انجام شد، تمامی شاخص‌های خطای مقداری، از جمله RMSE، برحسب میلی‌متر در روز گزارش شدند (Caracciolo et al., 2018; Gadelha et al., 2019; Mahmoud et al., 2019). در انطباق مکانی، مقدار نزدیک‌ترین پیکسل به هر ایستگاه با فاصله اقلیدسی استخراج و با مشاهده زمینی جفت شد (Hosseini-Moghari & Tang, 2020; Maghsood et al., 2019; Mahmoud et al., 2018; Xu et al., 2017).

15- Missing

16- Outliers

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »



شکل ۱: شمال غرب ایران (نقاط مشکی محل قرار گیری ایستگاه های بارانسنجی و نقاط قرمز مرکز شبکه های GPM-IMERG هستند).

با فرض ماهیت سیستماتیک و غیرتصادفی اریبی GPM IMERG و وابستگی آن به ویژگی‌های مکانی، اریبی هر زوج داده به‌عنوان تفاضل بارش ماهواره‌ای و زمینی (به عنوان دادهٔ مرجع[17]) محاسبه و با متغیرهای عرض جغرافیایی (شاخص اقلیم کلان و گردش جوی)، طول جغرافیایی (سامانه‌های جوی و فاصله از رطوبت) و ارتفاع (فرآیندهای توپوگرافیکی نظیر صعود اجباری) مدل‌سازی شد. جهت شناسایی عوامل مؤثر و کاهش پیچیدگی مدل، از تحلیل واریانس (ANOVA[18]) استفاده شد و تنها مدل‌هایی با ضرایب معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد وارد مرحله کالیبراسیون شدند. همچنین برای لحاظ‌کردن پویایی خطا و رژیم‌های بارندگی، داده‌ها در ۱۲ ماه و شش طبقه شدت بارش (جدول ۱) تفکیک شدند؛ تفکیک داده‌ها بر اساس ۱۲ ماه و شش طبقه شدت بارش، ۷۲ زیرمجموعه بالقوه ماه–شدت ایجاد کرد. انتخاب مدل به‌طور مستقل برای زیرمجموعه‌های دارای حداقل ۱۰ نمونه انجام شد و مقادیر سایر زیرمجموعه‌ها بدون تصحیح باقی ماند. ارزیابی توپوگرافی نیز بر پایه چهار طبقه ارتفاعی (جدول ۲) صورت گرفت. چارچوب این طبقه‌بندی‌های بارش (جدول ۱) و ارتفاع (جدول ۲) با بهره‌گیری از رویکرد ارائه‌شده توسط حسینی مغاری و تانگ (۲۰۲۰) شکل گرفت (Hosseini-Moghari & Tang, 2020)؛ با این تفاوت که در پژوهش حاضر، آستانه کلاس‌ها متناسب با شرایط هیدروکلیماتولوژیک و گرادیان ارتفاعی منطقه شمال‌غرب ایران بازتعریف و بومی‌سازی شد. این بومی‌سازی امکان تحلیل دقیق‌تر و نظام‌مندِ تغییرپذیری عملکرد محصول ماهواره‌ای را در دامنه‌های مختلف شدت بارش و شرایط توپوگرافی فراهم آورده است.

17- Ground Truth

18- Analysis of Variance

جدول ۱: دسته بندی شدت بارش برای شمالغرب ایران.

دسته بندی بارش	میزان بارندگی روزانه (mm/day) یا P
بارش خفیف Light precipitation	$0 \leq P < 1$
بارش کم تا متوسط Low moderate precipitation	$1 \leq P < 5$
بارش متوسط Moderate precipitation	$5 \leq P < 20$
بارش سنگین Heavy precipitation	$20 \leq P < 40$
بارش حدی Extreme precipitation	$40 \leq P < 90$
بارش سیل آسا Torrential precipitation	$90 \leq P$

جدول ۲: دسته بندی ایستگاه های سینوپتیکی و باران سنجی بر حسب ارتفاع در شمالغرب ایران.

تعداد ایستگاه	دسته بندی ایستگاه بر اساس ارتفاع	ارتفاع ایستگاه (m) یا H
۳۰	طبقه ارتفاعی پایین Low-Elevation Stations	$\mathbf{0 \leq H < 1000}$
۶۵	طبقه ارتفاعی میانی Mid-Elevation Stations	$1000 \leq H < 1500$
۸۰	طبقه ارتفاعی بالا High-Elevation Stations	$\mathbf{1500 \leq H < 2000}$
۱۳	طبقه ارتفاعی بسیار بالا Very High-Elevation Stations	$2000 \leq H$

همان‌گونه که بیان شد، در این پژوهش فرض گردید که مؤلفه سیستماتیک خطای محصول GPM-IMERG تابعی از مختصات مکانی و شرایط توپوگرافی منطقه مطالعه است. ازاین‌رو تابع اریبی به‌صورت یک نگاشت چندمتغیره تعریف شد:

$$\mathrm{Bias} = f(\mathrm{Lon}, \mathrm{Lat}, \mathrm{Alt}) \quad (۱)$$

در این رابطه، Bias بیانگر مقدار اریبی، Lon طول جغرافیایی، Lat عرض جغرافیایی و Alt ارتفاع از سطح متوسط دریا است. به‌منظور جلوگیری از تحمیل یک ساختار از پیش تعیین‌شده به تابع اریبی، برای هر متغیر سه وضعیت شامل عدم حضور، حضور خطی و حضور درجه دوم در نظر گرفته شد. بنابراین فضای مدل‌ها از حاصل‌ضرب دکارتی مجموعه حالات هر متغیر تشکیل گردید:

$$\Omega = \{0,1,2\}_{\mathrm{Lon}} \times \{0,1,2\}_{\mathrm{Lat}} \times \{0,1,2\}_{\mathrm{Alt}} \quad (۲)$$

که اندازه آن برابر است با:

$$|\Omega| = 3^3 = 27 \quad (۳)$$

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

مدل عمومی به‌گونه‌ای تعریف شد که در آن مرتبه حضور هر متغیر در مدل مشخص می‌شود؛ به‌طوری‌که مقدار صفر بیانگر حذف متغیر از مدل، مقدار یک نشان‌دهنده حضور خطی و مقدار دو بیانگر حضور درجه دوم آن متغیر است. مدل عمومی به‌صورت:

$$\mathrm{Bias} = \beta + \sum_{i=1}^{3} \alpha_i X_i^{p_i} \quad (۴)$$

تعریف شد که در آن

$$X_1 = \mathrm{Lon}, X_2 = \mathrm{Lat}, X_3 = \mathrm{Alt} \quad (۵)$$

و $p_i \in \{0,1,2\}$ نمایانگر مرتبه حضور هر متغیر است. مقدار $p_i = 0$ به معنای حذف متغیر، $p_i = 1$ بیانگر حضور خطی و $p_i = 2$ نشان‌دهنده حضور درجه دوم آن متغیر است. در حالت $p_1 = p_2 = p_3 = 0$، مدل به فرم ثابت:

$$B = \beta \quad (۶)$$

تقلیل می‌یابد که فاقد هرگونه متغیر مستقل بوده و در فرآیند مدل‌سازی حذف شد.

برای تصحیح اریبی GPM-IMERG، سه رویکرد در معادلات (۷) تا (۹) بررسی شد: مدل تصحیح افزایشی[۱۹] (معادله ۷) مناسب برای خطاهای ثابت و مستقل از شدت بارش، مدل تصحیح ضریبی[۲۰] (معادله ۸) برای خطاهای متناسب با میزان بارندگی، و در نهایت مدل ترکیبی[۲۱] (معادله ۹). مدل ترکیبی با تلفیق هم‌زمان مؤلفه‌های افزایشی و نسبی، انعطاف‌پذیری بیشتری در مدل‌سازی رفتارهای غیرخطی خطا داشته و دامنه وسیع‌تری از خطاهای سیستماتیک را نسبت به دو روش پیشین پوشش می‌دهد.

$$B = G - S \Rightarrow \tilde{S} = B + S \quad (۷)$$

$$B = G/S \Rightarrow \tilde{S} = B \times S \quad (۸)$$

$$B = (G - S)/S \Rightarrow \tilde{S} = B \times S + S \quad (۹)$$

به‌منظور برآورد ضرایب مدل‌های پیشنهادی، از روش اعتبار سنجی متقابل مونت کارلو (MCCV[22]) بهره گرفته شد (Girard, 1989; Hashemi et al., 2017). انتخاب این رویکرد با هدف کاهش حساسیت مدل نسبت به نحوه تفکیک داده‌ها و افزایش قابلیت اعتماد نتایج صورت گرفت. در این چارچوب، کل داده‌های زوج‌شده در ۱۰۰۰ تکرار مستقل، به‌صورت تصادفی در قالب تقسیم‌بندی برابر (تخصیص ۵۰ درصدی داده‌ها) به دو زیرمجموعه کالیبراسیون و اعتبارسنجی تفکیک شدند. ضرایب بهینه در هر تکرار با استفاده از الگوریتم Levenberg–Marquardt و حل‌کننده غیرخطی در محیط پایتون، با هدف حداقل‌سازی تابع هدف RMSE برآورد گردید. پس از اتمام تمامی تکرارها، میانگین پارامترهای حاصل به‌عنوان ضرایب نهایی مدل در نظر گرفته شد و مدلی که کمترین RMSE را در مرحله اعتبارسنجی برای هر زیرمجموعه (ماه-شدت) ارائه می‌داد، به‌عنوان مدل بهینه برای تولید داده‌های اصلاح‌شده انتخاب شد. تفکیک بر مبنای زوج‌های روزانه در هر زیرمجموعه ماه–شدت انجام شد و جداسازی ایستگاهی یا زمانی صورت نگرفت. غربال متغیرها پیش از

19- Additive Bias Correction

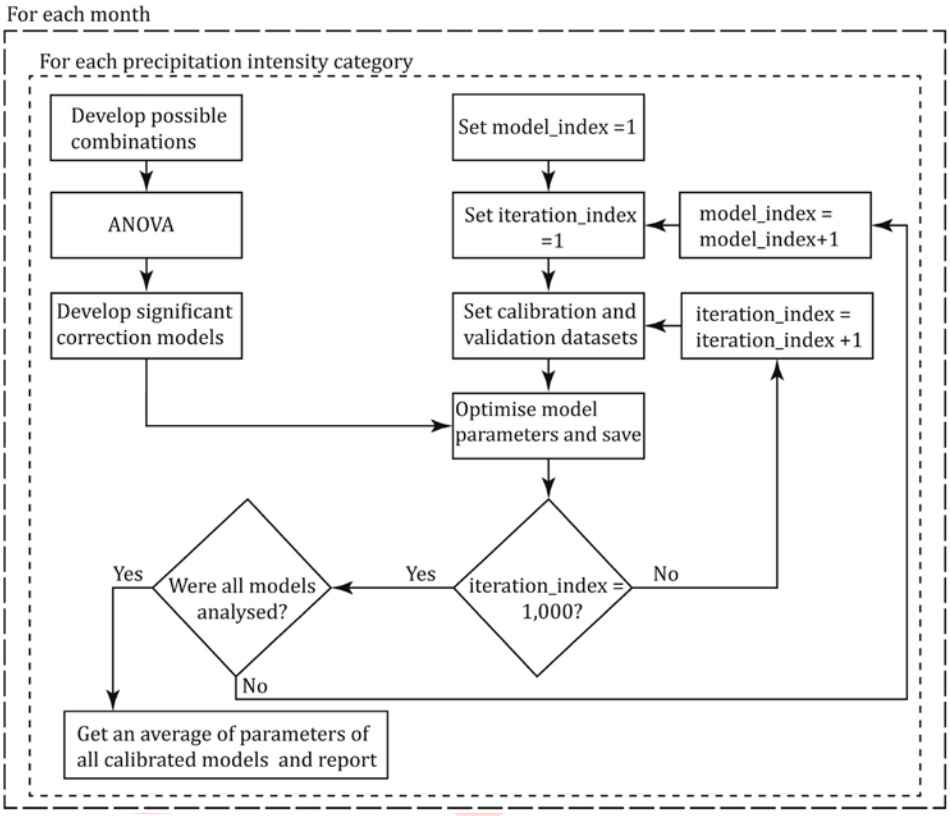
20- Multiplicative Bias Correction

21- Hybrid Bias Correction

22- Monte Carlo Cross Validation

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

تفکیک انجام شد و انتخاب رابطه تصحیح به طبقه شدت تعیین‌شده از بارش زمینی وابسته بود. شاخص‌های نهایی نیز پس از اعمال روابط منتخب بر کل داده‌های توسعه مدل محاسبه شدند؛ بنابراین، عملکرد آزمون مستقل محسوب نمی‌شوند. پراکندگی ضرایب و خطای اعتبارسنجی بین تکرارها ذخیره و گزارش نشد؛ بنابراین، خروجی‌های موجود برای ارزیابی کمی پایداری ضرایب کافی نیستند. همچنین، زیرمجموعه‌های ماه–شدت دارای کمتر از ۱۰ نمونه از کالیبراسیون کنار گذاشته شدند و مقادیر خام آن‌ها بدون تغییر باقی ماند. فرآیند جامع و نظام‌مند توسعه، بهینه‌سازی و گزینش مدل‌های تصحیح اریبی در فلوچارت (شکل ۲) ترسیم شده است.



شکل ۲: فلوچارت تصحیح اریبی

برای کمی‌سازی عملکرد محصول GPM-IMERG قبل و بعد از تصحیح اریبی از مجموعه‌ای از شاخص‌های پیوسته و گسسته استفاده شد. شاخص‌های پیوسته شامل ضریب همبستگی (CC[23])، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE[24])، کارائی نش-ساتکلیف (NSE[25])، اریبی نسبی (rBias[26])، اریبی نسبی اصلاح شده[۲۷]

23- Correlation Coefficient
24- Root Mean Square Error
25- Nash-Sutcliffe Efficiency
26- Relative Bias
27- Modified Relative Bias

(rBias_ε)، کارایی کلینگ-گویتا (KGE[28]) و شاخص توافق ویلموت (WIA[29]) مورد کمی‌سازی قرار گرفت؛ شاخص‌های ارزیابی گسسته (طبقه‌بندی) شامل تشخیص هشدار نادرست (FAR[30])، احتمال تشخیص (POD[31])، شاخص موفقیت بحرانی (CSI[32]) و نمره مهارتی هایدیکه (HSS[33]) می‌باشند. تعریف و روابط ریاضی تمامی شاخص‌ها در جدول ۳ ارائه شده و جدول توافقی مورد استفاده برای شاخص‌های گسسته در جدول ۴ نشان داده شده است. این شاخص‌ها به‌طور گسترده در مطالعات ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای به کار رفته‌اند (Ghajarnia et al., 2015; Hosseini-Moghari & Tang, 2020).

جدول ۳: فهرستی از معیارهای عملکرد مورد استفاده برای تعیین کمیت عملکرد GPM-IMERG.

ردیف	معیار عملکرد	معادله	مقدار مطلوب (بدترین مقدار)	واحد
۱	ضریب همبستگی Correlation Coefficient (CC)	$CC = \frac{\sum_{i=1}^{n}((G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(G_i - \bar{G})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})^2}}$	$+1$ (-1)	ندارد
۲	ریشه میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - G_i)^2}{n}}$	0 $(\approx +\infty)$	$\frac{mm}{day}$
۳	کارائی نش-ساتکلیف Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - G_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(G_i - \bar{G})^2}$	1 $(\approx -\infty)$	ندارد
۴	اریبی نسبی Relative Bias (rBias)	$rBias = 100\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^{n} G_i}$	0 $(-\infty \text{ or } +\infty)$	٪
۵	اریبی نسبی اصلاح شده Modified Relative Bias (rBias_ε)	$rBias_\varepsilon = 100\left(\sum_{i=1}^{n}(2\frac{S_i - G_i}{\varepsilon + S_i + G_i})\right)$	0 $(-\infty \text{ or } +\infty)$	٪
۶	تشخیص هشدار نادرست False Alarm Ratio (FAR)	$FAR = \frac{F}{F + H}$	0 (1)	ندارد
۷	احتمال تشخیص Probability of Detection (POD)	$POD = \frac{H}{H + M}$	1 (0)	ندارد
۸	شاخص موفقیت بحرانی Critical Success Index (CSI)	$CSI = \frac{H}{H + M + F}$	1 (0)	ندارد
۹	نمره مهارتی هایدیکه Heidke Skill Score (HSS)	$HSS = \frac{2(H \times C - F \times M)}{(H + F) \times (F + C) + (H + M) \times (M + C)}$	1 $(\approx -\infty)$	ندارد
۱۰	کارایی کلینگ-گویتا Kling-Gupta efficiency (KGE)	$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$	1 $(\approx -\infty)$	ندارد

28- Kling-Gupta Efficiency

29- Willmott Index of Agreement

30- False Alarm Detection

31- Probability of detection

32- Critical Success Index

33- Heike Skill Score

		$\beta = \frac{\bar{S}}{\bar{G}}\ \gamma = \frac{\sigma^S}{\sigma^G}$		
۱۱	شاخص توافق ویلموت Willmott Index of Agreement (WIA)	$WIA = \begin{cases} 1 - \frac{A}{B} & A \le B \\ \frac{B}{A} - 1 & A > B \end{cases}$ $A = \sum_{i=1}^{n} \lvert S_i - G_i \rvert \quad B = 2\sum_{i=1}^{n} \lvert G_i - \bar{G} \rvert$	1 (-1)	ندارد

توضیحات: G و S در جدول ۳ نشان دهندهٔ باران سنج و بارش مبتنی بر GPM-IMERG هستند (G مخفف "Ground-truth" یا واقعیت زمینی است و S مخفف "Satellite" یا ماهواره است). علامت بار و σ میانگین و انحراف معیار را نشان می دهد (به عنوان مثال $\bar{S}$ و σ^S میانگین و انحراف معیار GPM-IMERG رانشان می دهد). i عنصر i-ام پایگاه داده گیج-ماهواره جفت شده را نشان می دهد و n تعداد کل است (به عنوان مثال برای ارزیابی کلی n=205860). برای تعریف F، M، H و C به جدول ۴ رجوع شود.

جدول ۴: جدول توافقی که تعریف پارامترهای مورد استفاده در معیارهای عملکرد گسسته را نشان می دهد.

جدول توافقی		باران سنج (بارش دیدبانی شده)	
		بارش دیدبانی می شود (1)	بارش دیدبانی نمی شود (0)
GPM-IMERG (بارش تخمینی)	بارش تشخیص داده می شود (1)	Hits (H) یا اصابت ها (1,1)	False alarms (F) یا هشدارهای کاذب (0,1)
	بارش تشخیص داده نمی شود (0)	Misses (M) یا از دست رفته ها (1,0)	Correct negatives (C) یا منفی های درست (0,0)

توضیحات: مشاهدات زمینی به‌عنوان مرجع وقوع بارش در نظر گرفته شدند. مقدار بارش روزانه زمینی بیشتر از ، 0.5 mm/day «وقوع بارش» و مقدار کمتر یا مساوی این آستانه، «عدم وقوع بارش» تعریف شد. به‌طور جداگانه، مقدار بارش روزانه ماهواره‌ای بیشتر از همین آستانه، «آشکارسازی بارش» و مقدار کمتر یا مساوی آن، «عدم آشکارسازی بارش» محسوب شد. از مقایسه این دو وضعیت، چهار حالت اصابت، هشدار کاذب، عدم تشخیص و منفی درست مطابق جدول ۴ تعیین شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساختار زمانی و مکانی مدل‌های تصحیح اریبی

نتایج جدول ۵ نشان داد که ساختار مدل‌های توسعه‌یافته برای تصحیح اریبی GPM-IMERG در ماه‌ها و طبقات مختلف شدت بارش یکسان نیست. مدل‌های به‌دست‌آمده به‌صورت روابط افزایشی، ضربی و ترکیبی تغییر کردند و در تعدادی از آن‌ها، متغیرهای طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع نیز وارد شدند. این ناهمگونی ساختاری نشان می‌دهد که اریبی GPM-IMERG در شمال‌غرب ایران ماهیتی ثابت و یکنواخت ندارد، بلکه به زمان، شدت بارش و ویژگی‌های فیزیوگرافی منطقه وابسته است.

از نظر کاربردی، این یافته بیانگر آن است که استفاده از یک ضریب تصحیح ثابت برای کل منطقه نمی‌تواند ناهمگونی مکانی و زمانی خطا را به‌طور کامل بازنمایی کند. ورود ارتفاع و مختصات جغرافیایی به برخی روابط نیز نشان می‌دهد که بخشی از خطای محصول با ساختار مکانی بارش و توپوگرافی منطقه مرتبط است. بنابراین، چارچوب پیشنهادی با در نظر گرفتن متغیرهای مکانی و تفکیک زمانی و شدت بارش، امکان تصحیح واقع‌بینانه‌تر اریبی را فراهم می‌کند. این نتیجه با شواهد پیشین درباره وابستگی عملکرد IMERG به

رژیم بارشی، مقیاس زمانی، اقلیم و توپوگرافی سازگار است (Aslami et al., 2019; Gheysouri, Sigaroodi, et al., 2025; Ghorbanian et al., 2022; Gu et al., 2026; Guo et al., 2024; Hosseini-Moghari & Tang, 2020; Li et al., 2023; Maghsood et al., 2019; Nongmaithem et al., 2025; Papacharalampous et al., 2023; Zhu et al., 2024).

در مجموع، اگرچه نسخه V07 در مقایسه با نسخه‌های پیشین بهبود یافته است، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که ارتقای الگوریتم جهانی محصول، ضرورت کالیبراسیون و تصحیح اریبی منطقه‌ای را برطرف نمی‌کند؛ به‌ویژه در شمال‌غرب ایران که از ناهمگونی اقلیمی و توپوگرافی قابل‌توجهی برخوردار است.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

جدول ۵. مدل‌های تصحیح اریبی توسعه‌یافته برای هر ماه و هر طبقه شدت بارش (از بارش‌های خفیف تا متوسط).

Precipitation intensity (P) categories (mm/day)			
Months	**Light** $(0 \le P < 1)$	**Low moderate** $(1 \le P < 5)$	**Moderate** $(5 \le P < 20)$
JAN	$\tilde{S} = S * (0.0050 - 0.0010lon - 0.0008lon^2 - 0.0005lat - 0.0012lat^2)$	$\tilde{S} = S + S * (-0.5346 + 0.0783lat)$	$\tilde{S} = S + (7.4584 + 0.1909lat)$
FEB	$\tilde{S} = S * (0.0029 + 0.0004lat - 0.0006lat^2)$	$\tilde{S} = S + S * (-0.5544 - 0.1196lon + 0.0847lat)$	$\tilde{S} = S + (7.0403 - 0.2720alt)$
MAR	$\tilde{S} = S + S * (-0.9969 - 0.0005lon - 0.0005lon^2 - 0.0003lat - 0.0008lat^2 - 0.0008alt)$	$\tilde{S} = S + S * (-0.6727 + 0.0641lat - 0.0283lat^2)$	$\tilde{S} = S + (7.2119 - 0.0852lon - 0.3780lon^2)$
APR	$\tilde{S} = S + S * (-0.9956 - 0.0011lon - 0.0012lon^2)$	$\tilde{S} = S + S * (-0.7800 + 0.0394lon)$	$\tilde{S} = S + (5.9033 + 0.2496lat + 0.5903lat^2)$
MAY	$\tilde{S} = S + S * (-0.9973 - 0.0001lon - 0.0007lon^2)$	$\tilde{S} = S + S * (-0.8078 - 0.0533lon)$	$\tilde{S} = S + (4.1806 + 0.0990lon + 0.5346lon^2 + 0.1648lat + 0.6307lat^2)$
JUN	$\tilde{S} = S + S * (-0.9941 + 0.0002lon - 0.0013lon^2 - 0.0001alt - 0.0005alt^2)$	$\tilde{S} = S * (0.3898 + 0.0839alt)$	$\tilde{S} = S + (7.0302 - 0.5746lon)$

JUL	$\tilde{S} = S + S * (-0.9966 - 0.0004lon - 0.0007lon^2 - 0.0001lat - 0.0011lat^2 - 0.0005alt)$	$\tilde{S} = S + S * (-0.6017 - 0.1035lon - 0.0552lon^2)$	$\tilde{S} = S + (7.3903 - 1.1870lon - 0.6076lon^2)$
AUG	$\tilde{S} = S + S * (-0.9952 - 0.0005lon - 0.0013lon^2)$	$\tilde{S} = S + (1.1683 + 0.2502lon)$	$\tilde{S} = S + (8.3161 - 0.0279alt - 0.3599alt^2)$
SEP	$\tilde{S} = S + S * (-0.9974 - 0.0012lon - 0.0008lat - 0.0009lat^2 - 0.0010alt)$	$\tilde{S} = S + S * (-0.7423 + 0.0372alt)$	$\tilde{S} = S + (7.0144 + 0.4104alt)$
OCT	$\tilde{S} = S + S * (-0.9963 - 0.0012lat - 0.0008lat^2 - 0.0013alt)$	$\tilde{S} = S + S * (-0.7873 + 0.0081alt)$	$\tilde{S} = S + (5.6701 + 0.4103alt)$
NOV	$\tilde{S} = S * (0.0067 - 0.0021lon - 0.0010lat - 0.0022lat^2 - 0.0028alt)$	$\tilde{S} = S + S * (-0.6134 + 0.0315lat - 0.0589lat^2)$	$\tilde{S} = S + (6.5530 + 0.4177lon)$
DEC	$\tilde{S} = S * (0.0024 + 0.0003lat - 0.0005lat^2)$	$\tilde{S} = S + (1.5932 + 0.1398lat)$	$\tilde{S} = S + (7.5733 - 0.1920lat - 0.2798lat^2)$

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

ادامه جدول ۵. (بارش سنگین تا سیل آسا)

Precipitation intensity (P) categories (mm/day)			
Months	**Heavy ($20 \leq P < 40$)**	**Extreme ($40 \leq P < 90$)**	**Torrential ($90 \leq P$)**
JAN	$\tilde{S} = S + (24.1961 - 0.2697lat - 1.7506lat^2)$	$\tilde{S} = S + (48.3674 - 1.6376lat)$	
FEB	$\tilde{S} = S + (21.0113 + 1.1803lat)$		
MAR	$\tilde{S} = S + (24.2825 + 1.0134lat - 3.0418lat^2)$	$\tilde{S} = S + (41.5946 + 1.3703lat)$	
APR	$\tilde{S} = S + (21.3812 - 0.8136lon)$	$\tilde{S} = S + (41.6797 + 6.6691alt)$	
MAY	$\tilde{S} = S + (22.9539 + 0.8477lat - 2.7642lat^2 - 2.4413alt)$	$\tilde{S} = S + (43.7072 - 2.8247alt)$	
JUN	$\tilde{S} = S + (19.6361 + 0.5178lon)$		
JUL	$\tilde{S} = S + (21.5569 + 1.6543alt)$		

AUG	$\tilde{S} = S + (23.1397 + 1.8930lon)$		
SEP			
OCT	$\tilde{S} = S + (20.9589 + 1.7226lat + 1.1523lat^2)$	$\tilde{S} = S + (42.3064 - 2.8841alt)$	
NOV	$\tilde{S} = S + (26.1848 - 3.6133alt)$		
DEC	$\tilde{S} = S + (21.4546 - 2.4453lat)$	$\tilde{S} = S + (58.3235 - 11.5440lon - 14.9727lon^2)$	

$\tilde{S}$ = Corrected GPM − IMERG, S = Original GPM − IMERG, lat = latitude, lon = longitude, alt = altitude

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

۳-۲- بهبود عملکرد کلی پس از تصحیح اریبی

مقایسه داده‌های خام و تصحیح‌شده نشان داد که چارچوب پیشنهادی عملکرد GPM-IMERG را در اغلب شاخص‌ها به‌طور محسوسی بهبود داده است (جدول ۶). ضریب همبستگی از 0.1659 به 0.8532 افزایش یافت و RMSE از 3.7207 به 1.6288 میلی‌متر در روز کاهش پیدا کرد که معادل کاهش 56.2% خطاست. همچنین، تغییر NSE از مقداری منفی به 0.7042 نشان می‌دهد که داده تصحیح‌شده توانسته است بخش قابل‌توجهی از تغییرپذیری بارش مشاهده‌شده را بازنمایی کند. این بهبود از نظر کاربردهای هیدرولوژیکی اهمیت دارد؛ زیرا خطای بارش ورودی می‌تواند به عدم‌قطعیت شبیه‌سازی رواناب و سایر مؤلفه‌های چرخه آب منتقل شود (Ghorbanian et al., 2022).

بهبود هم‌زمان شاخص‌های پیوسته، اریبی و رخدادمحور نشان داد که اثر تصحیح به یک مؤلفه خاص محدود نبوده است. کاهش FAR و افزایش POD، CSI و HSS بیانگر کاهش هشدارهای کاذب و بهبود تشخیص رخدادهای بارشی است. بااین‌حال، تغییر rBias از 20.8645 به 15.8377− درصد نشان می‌دهد که حذف بیش‌برآورد اولیه در برخی موارد به بیش‌تصحیح و کم‌برآوردی منجر شده است. بنابراین، ارزیابی مدل باید بر مجموعه‌ای از شاخص‌ها استوار باشد؛ زیرا افزایش همبستگی به‌تنهایی تضمین‌کننده صحت مقادیر بارش نیست. بخشی از خطای باقی‌مانده نیز می‌تواند ناشی از تفاوت میان اندازه‌گیری نقطه‌ای باران‌سنج و برآورد میانگین پیکسلی ماهواره باشد.

این یافته‌ها با ارزیابی‌های پیشین در ایران سازگار است که وابستگی عملکرد IMERG به نسخه محصول، نوع اجرا، فصل و مقیاس زمانی را نشان داده‌اند (Hosseini-Moghari & Tang, 2020)(Maghsood et al., 2019). بااین‌حال، نتایج حاضر نشان می‌دهد که حتی در نسخه Final Run V07 نیز تصحیح منطقه‌ای و شرطی‌سازی مدل برحسب ویژگی‌های بارش و توپوگرافی برای دستیابی به برآوردهای قابل‌اعتماد ضروری است.

جدول ۶. مقایسه عملکرد محصول بارش GPM-IMERG V07 Final Run پیش و پس از تصحیح اریبی در کل دوره مورد مطالعه

Dataset	Sample Size	CC	RMSE	NSE	rBias	rBias_ε	FAR	POD	CSI	HSS	KGE	WIA
Before Correction	205860	0.1659	3.7207	-0.5436	20.8645	18.6901	0.7685	0.4331	0.1776	0.1785	0.1076	0.4961
After Correction	205860	0.8532	1.6288	0.7042	-15.8377	-7.2902	0.0000	0.6370	0.6370	0.7564	0.7114	0.8607

۳-۳- تغییرات ماهانه و فصلی عملکرد

نتایج ماهانه و فصلی نشان داد که تصحیح اریبی در تمام دوره‌های سال مؤثر بوده، اما میزان بهبود از نظر زمانی یکنواخت نبوده است (جدول‌های ۷ و ۸). پس از تصحیح، ضریب همبستگی ماهانه از 0.7261 در سپتامبر تا 0.9154 در دسامبر تغییر کرد. ضریب همبستگی در همه ماه‌ها افزایش و RMSE در همه ماه‌ها کاهش یافت؛ بااین‌حال، تفاوت باقی‌مانده در RMSE و rBias میان ماه‌ها نشان می‌دهد که ساختار خطای IMERG همچنان به رژیم فصلی، مقدار بارش و ویژگی سامانه‌های بارشی وابسته است. از آنجا که در این پژوهش آزمون مستقلی برای بررسی برابری واریانس خطاهای ماهانه انجام نشد، این یافته‌ها باید به‌عنوان شواهدی از تغییرپذیری ماهانه شاخص‌های خطا و نه اثبات آماری ناهمسانی واریانس‌ها تفسیر شوند. این تغییرپذیری زمانی، استفاده از روابط تصحیح جداگانه برای ماه‌ها و طبقات مختلف شدت بارش را توجیه می‌کند.

در مقیاس فصلی، زمستان پس از تصحیح بیشترین مقادیر CC، NSE و KGE را داشت، درحالی‌که پاییز کمترین مقادیر NSE و KGE را نشان داد. این تغییرات احتمالاً تنها حاصل رفتار آماری مدل نیست، بلکه تفاوت نوع سامانه‌های بارشی، سهم بارش‌های همرفتی و اوروگرافیک و تغییرپذیری مکانی بارش نیز در آن نقش دارد. این الگو با مطالعات پیشین در ایران که تغییرات فصلی عملکرد محصولات ماهواره‌ای را گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد (Maghsood et al., 2019).

با وجود بهبود شاخص‌های خطا و همبستگی، rBias در تابستان و پاییز پس از تصحیح منفی شد. این وضعیت نشان می‌دهد که مدل بیش‌برآورد شدید داده خام را کاهش داده، اما در برخی فصل‌ها به کم‌برآوردی نسبی منجر شده است. بنابراین، تنظیم دقیق‌تر روابط تصحیح برای حفظ حجم واقعی بارش، به‌ویژه در فصل‌های گرم‌تر، همچنان ضروری است.

جدول ۷. مقایسه عملکرد ماهانه محصول بارش GPM-IMERG V07 Final Run پیش و پس از تصحیح اریبی

Dataset	Months	Sample Size	CC	RMSE	NSE	rBias	rBias_ε	FAR	POD	CSI	HSS	KGE	WIA
After Correction	Jan	17484	0.9042	1.4208	0.8106	-15.4420	-8.9159	0.0000	0.6271	0.6271	0.7420	0.7614	0.8695
Before Correction	Jan	17484	0.1172	3.7195	-0.2979	-0.5311	23.7140	0.7782	0.4298	0.1714	0.1254	0.0606	0.5206
After Correction	Feb	15792	0.7938	1.8152	0.6206	-23.5773	-10.7250	0.0000	0.5577	0.5577	0.6841	0.6578	0.8513
Before Correction	Feb	15792	0.1208	3.7094	-0.5843	23.9115	25.7331	0.7851	0.4360	0.1682	0.1214	0.0468	0.4683
After Correction	Mar	17484	0.8612	2.3176	0.7051	-14.0023	-13.1304	0.0000	0.6346	0.6346	0.7337	0.7065	0.8524
Before Correction	Mar	17484	0.1269	5.4726	-0.6443	18.3363	33.8796	0.7526	0.4845	0.1958	0.0743	0.0840	0.4514
After Correction	Apr	16920	0.8796	1.9080	0.7458	-13.2371	-8.2950	0.0000	0.6290	0.6290	0.7456	0.7298	0.8638
Before Correction	Apr	16920	0.1887	4.4844	-0.4042	25.1652	32.8154	0.7704	0.5234	0.1899	0.1614	0.0917	0.4862
After Correction	May	17484	0.8040	2.7833	0.5673	-13.7859	-14.1822	0.0000	0.6586	0.6586	0.7497	0.6509	0.8238

فعال در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

Before Correction	May	17484	0.1696	5.7704	-0.8599	28.3938	23.3871	0.6587	0.5304	0.2621	0.1967	0.1116	0.4556
After Correction	Jun	16920	0.8437	0.9007	0.7013	-23.7824	-3.9906	0.0000	0.5282	0.5282	0.6802	0.6325	0.8615
Before Correction	Jun	16920	0.1713	2.0481	-0.5445	55.7176	14.6032	0.8508	0.3859	0.1206	0.1539	-0.0782	0.4296
After Correction	Jul	17484	0.8425	0.9343	0.6972	-25.0758	-4.0201	0.0000	0.5006	0.5006	0.6568	0.6013	0.8598
Before Correction	Jul	17484	0.1740	2.3845	-0.9727	77.2345	9.9451	0.8429	0.3454	0.1211	0.1634	-0.1809	0.3780
After Correction	Aug	17484	0.7802	0.9496	0.6070	-9.3069	-0.6429	0.0000	0.8996	0.8996	0.9456	0.7430	0.8829
Before Correction	Aug	17484	0.1283	1.7118	-0.2771	30.9092	9.2500	0.8756	0.3224	0.0986	0.1429	-0.0461	0.4787
After Correction	Sep	16920	0.7261	0.8090	0.5144	-36.3440	-3.7460	0.0000	0.4343	0.4343	0.5963	0.4564	0.8383
Before Correction	Sep	16920	0.1075	1.7682	-1.3200	54.7115	5.3143	0.8405	0.2643	0.1105	0.1588	-0.0634	0.4147
After Correction	Oct	17484	0.8537	1.6261	0.6906	-18.3726	-9.2093	0.0000	0.5810	0.5810	0.7083	0.6360	0.8495
Before Correction	Oct	17484	0.1441	4.0156	-0.8869	36.3394	18.6904	0.7595	0.4209	0.1807	0.1757	0.0491	0.4563
After Correction	Nov	16920	0.8079	1.3273	0.6384	-27.7064	-9.5359	0.0000	0.4859	0.4859	0.6270	0.5761	0.8462
Before Correction	Nov	16920	0.1633	2.7531	-0.5557	19.8009	15.7509	0.7751	0.3727	0.1631	0.1652	0.1105	0.4992
After Correction	Dec	17484	0.9154	1.4355	0.8348	-1.4589	-1.3051	0.0000	0.9684	0.9684	0.9816	0.9129	0.8961
Before Correction	Dec	17484	0.0930	3.8554	-0.1917	-24.2763	11.6772	0.8086	0.2752	0.1273	0.0873	0.0172	0.5621

جدول ۸. مقایسه عملکرد فصلی محصول بارش GPM-IMERG V07 Final Run پیش و پس از تصحیح اریبی

Dataset	Season	Sample Size	CC	RMSE	NSE	rBias	rBias_ε	FAR	POD	CSI	HSS	KGE	WIA
After Correction	**DJF**	50760	0.8819	1.5589	0.7723	-13.1857	-6.8572	0.0000	0.7144	0.7144	0.8117	0.8003	0.8732
Before Correction	DJF	50760	0.1084	3.7638	-0.3272	-1.2757	20.1962	0.7884	0.3822	0.1577	0.1149	0.0591	0.5195
After Correction	**MAM**	51888	0.8456	2.3680	0.6682	-13.7327	-11.9080	0.0000	0.6428	0.6428	0.7448	0.6938	0.8455
Before Correction	MAM	51888	0.1620	5.2791	-0.6492	23.9536	29.9971	0.7266	0.5119	0.2169	0.1458	0.1037	0.4660
After Correction	**JJA**	51888	0.8248	0.9287	0.6723	-20.7199	-2.8725	0.0000	0.6068	0.6068	0.7473	0.6912	0.8664
Before Correction	JJA	51888	0.1612	2.0666	-0.6229	57.6306	11.2298	0.8544	0.3558	0.1152	0.1566	-0.0896	0.4238
After Correction	**SON**	51324	0.8293	1.3028	0.6619	-23.7436	-7.5159	0.0000	0.5228	0.5228	0.6656	0.5897	0.8499
Before Correction	SON	51324	0.1569	3.0038	-0.7976	32.6416	13.3116	0.7764	0.3801	0.1638	0.1880	0.0740	0.4765

۳-۴- وابستگی خطا به شدت بارش

طبقه‌بندی شدت بارش نشان داد که ساختار خطای GPM-IMERG به‌شدت شدت‌وابسته و غیرخطی است (جدول ۹). محصول خام در بارش‌های خفیف با بیش‌برآورد و هشدارهای کاذب فراوان همراه بود، درحالی‌که در بارش‌های متوسط تا شدید عمدتاً کم‌برآوردی مشاهده شد. این تفاوت نشان می‌دهد که استفاده از یک رابطه ثابت برای کل دامنه شدت بارش مناسب نیست.

در بارش‌های خفیف، تصحیح موجب کاهش چشمگیر RMSE شد، اما بهبود متناظری در تشخیص رخداد ایجاد نکرد و کم‌برآوردی قابل‌توجهی باقی ماند. این نتیجه نشان می‌دهد که کاهش خطای مطلق در مقادیر کوچک الزاماً به معنای افزایش مهارت رخدادمحور نیست. اگرچه بخشی از اختلاف می‌تواند به محدودیت تشخیص بارش‌های بسیار ضعیف یا تفاوت مقیاس ماهواره و باران‌سنج مربوط باشد، تعیین سازوکار فیزیکی آن به داده‌های مستقلی درباره ساختار قائم جو و نوع سامانه بارشی نیاز دارد. در طبقه بارش خفیف، مقدار

بـزرگ rBias بایـد بـا توجـه بـه کوچـک‌بودن مجمـوع بـارش مشاهده‌شـده تفسـیر شـود. از آنجـا کـه ایـن مجمـوع مخـرج شـاخص را تشـکیل می‌دهـد، کوچـک‌بودن آن می‌توانـد درصـد اریبـی بزرگـی ایجـاد کنـد؛ در صـورت صفرشـدن مخـرج نیـز شـاخص تعریـف نمی‌شـود. بنـابراین، rBias در ایـن طبقـه همـراه بـا RMSE و سـایر شاخص‌ها بررسی می‌شود.

در طبقـه بـارش متوسـط، تصـحیح موجـب کـاهش RMSE و نزدیک‌شـدن اریبـی نسـبی بـه صـفر شـد کـه نشان‌دهنده بهبود برآورد حجـم بـارش در ایـن طبقـه اسـت. بااین‌حـال، بهبـود اریبـی حجمـی بـا بهبـود یکسـان همـه شـاخص‌ها همـراه نبـود؛ بنـابراین، عملکـرد روابـط بـر اسـاس مجموعـه شـاخص‌های جـدول ۹ ارزیـابی می‌شـود. در طبقـات سـنگین و حـدی نیـز کـاهش خطـای مقـداری و افـزایش احتمـال تشـخیص نشـان داد کـه رویکـرد شـدت‌محور در اصـلاح کم‌بـرآوردی رخـدادهای شـدید مـؤثر بـوده اسـت. بااین‌حـال، باقی‌مانـدن ضـعف برخـی شـاخص‌های ترکیبـی در بارش‌هـای حـدی نشـان می‌دهـد کـه بازسـازی کامـل سـاختار آمـاری ایـن رخـدادها همچنان دشوار است.

در طبقـه سیل‌آسـا تنهـا چهـار نمونـه وجـود داشـت. بـه دلیـل کمتـر بـودن تعـداد نمونـه‌ها از حـداقل ۱۰ نمونـه تعیین‌شده برای کالیبراسـیون، زیرمجموعـه‌های مـاه–شـدت ایـن طبقـه تصـحیح نشـدند و مقـادیر خـام بـدون تغییـر بـاقی ماندنـد. بنـابراین، یکسـان‌بودن شـاخص‌های پـیش و پـس از تصـحیح، ناشـی از اعمال‌نشـدن تصـحیح اسـت و نمی‌تـوان از آن دربـاره کـارایی روش بـرای بارش‌هـای سیل‌آسـا نتیجـه‌گیری کـرد. ارزیـابی ایـن طبقـه بـه تعـداد بیشـتری نمونـه مسـتقل نیـاز دارد. نتـایج حاضـر بـا مطالعـات انجام‌شـده در ایـران دربـاره وابسـتگی خطـای IMERG بـه شـدت و شـرایط زمـانی–مکـانی رخـدادهای حـدی همخـوانی دارد و ضـرورت تصـحیح شـدت‌محور را تأییـد می‌کند (Bakhtar et al., 2022).

جدول ۹. مقایسه عملکرد محصول بارش GPM-IMERG V07 Final Run در طبقات مختلف شدت بارش، پیش و پس از تصحیح اریبی

Dataset	Intensity	Sample Size	CC	RMSE	NSE	rBias	rBias_ε	FAR	POD	CSI	HSS	KGE	WIA
After Correction	Light Precipitation	183093	0.0662	0.0657	-0.0062	-79.6363	-1.0407	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.3432	0.6976
Before Correction	Light Precipitation	183093	0.0469	2.4063	-1348.6961	8167.5555	34.2830	0.9899	0.3766	0.0099	0.0100	-80.6831	-0.9530
After Correction	Low Moderate Precipitation	12365	0.0144	2.3917	-3.8405	-68.3977	-104.5161	0.0000	0.3799	0.3799	0.0000	-2.1469	-0.0699
Before Correction	Low Moderate Precipitation	12365	0.0391	4.4380	-15.6661	-19.1355	-81.8562	0.0000	0.4125	0.4125	0.0000	-3.0351	-0.3265
After Correction	Moderate Precipitation	9386	0.0499	5.8985	-1.6474	0.0075	-1.3259	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	-0.0072	0.3311
Before Correction	Moderate Precipitation	9386	0.0530	8.8367	-4.9417	-72.7028	-133.7453	0.0000	0.4527	0.4527	0.0000	-3.1700	-0.2324
After Correction	Heavy Precipitation	879	0.1420	8.5640	-1.9297	-0.7880	-2.8742	0.0000	0.9943	0.9943	0.0000	-0.0192	0.2893
Before Correction	Heavy Precipitation	879	0.1149	23.1140	-20.3412	-84.5496	-157.3447	0.0000	0.5518	0.5518	0.0000	-8.2985	-0.6303
After Correction	Extreme Precipitation	133	0.1366	19.5063	-2.1527	-9.5578	-16.5854	0.0000	0.9699	0.9699	0.0000	-0.1184	0.3010
Before Correction	Extreme Precipitation	133	0.1762	48.3222	-18.3473	-91.0028	-172.5520	0.0000	0.5564	0.5564	0.0000	-7.7810	-0.6218
After Correction	Torrential Precipitation	4	-0.9464	90.8424	-391.9684	-92.6508	-173.1206	0.0000	0.7500	0.7500	0.0000	-24.3036	-0.9110
Before Correction	Torrential Precipitation	4	-0.9464	90.8424	-391.9684	-92.6508	-173.1206	0.0000	0.7500	0.7500	0.0000	-24.3036	-0.9110

۳-۵- نقش ارتفاع و توپوگرافی در خطای GPM-IMERG

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اصالت، صداقت، امانت»

نتایج ارتفاعی نشان داد که عملکرد GPM-IMERG در امتداد گرادیان ارتفاعی تغییر می‌کند (جدول ۱۰). در داده خام، افزایش RMSE از مناطق با ارتفاع پایین به ارتفاعات بسیار بالا و تغییر تدریجی علامت rBias بیانگر آن بود که توپوگرافی نه‌تنها بر مقدار خطا، بلکه بر ساختار آن نیز اثر می‌گذارد. صعود اوروگرافیک، شیب و جهت دامنه، نوع سامانه بارشی و تغییر فاز بارش می‌توانند توزیع بارش را در مقیاس‌های کوچک تغییر دهند؛ درحالی‌که تفکیک مکانی حدود ۰.۱ درجه‌ای IMERG قادر به بازنمایی کامل این ناهمگنی نیست. ازاین‌رو، اختلاف مقیاس میان برآورد پیکسلی و اندازه‌گیری نقطه‌ای باران‌سنج یکی از منابع مهم خطا در مناطق کوهستانی محسوب می‌شود (Xu et al., 2017).

پس از تصحیح، CC در تمام طبقات ارتفاعی به بیش از 0.84 رسید و NSE در همه طبقات مثبت شد. همچنین، تفاوت عملکرد میان طبقات کاهش یافت؛ هرچند بیشترین RMSE همچنان در مناطق بسیار مرتفع باقی ماند. این وضعیت نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی بخش مهمی از ناهمگنی ارتفاعی خطا را اصلاح کرده، اما اثرات پیچیده توپوگرافی را به‌طور کامل حذف نکرده است. عملکرد هم‌زمان شاخص‌های نرمال‌شده و مطلق نیز نشان می‌دهد که اتکا به RMSE به‌تنهایی برای مقایسه طبقات ارتفاعی کافی نیست.

بهبود شاخص‌های رخداد در همه طبقات بیانگر افزایش قابلیت تشخیص بارش در امتداد گرادیان ارتفاعی بود. بااین‌حال، منفی‌شدن rBias پس از تصحیح نشان داد که کاهش بیش‌برآورد اولیه با مقداری بیش‌تصحیح و کم‌برآوردی همراه شده است. در نتیجه، توسعه‌های بعدی مدل باید علاوه بر کاهش خطا، حفظ حجم بارش را نیز هدف قرار دهند. این یافته با مطالعات جدید V07 و ارزیابی‌های انجام‌شده در مناطق کوهستانی همخوانی دارد که نشان داده‌اند بهبود نسخه محصول در همه شرایط توپوگرافی یکسان نیست و تصحیح منطقه‌ای همچنان ضروری است (Guo et al., 2024; Ramadhan et al., 2024; Zhu et al., 2024).

جدول ۱۰. مقایسه عملکرد محصول بارش GPM-IMERG V07 Final Run در طبقات مختلف ارتفاعی، پیش و پس از تصحیح اریبی

Dataset	Height Type	Sample Size	CC	RMSE	NSE	rBias	rBias_ε	FAR	POD	CSI	HSS	KGE	WIA
After Correction	Low-Elevation Stations	32850	0.8532	1.4005	0.7039	-18.9249	-7.5059	0.0000	0.5875	0.5875	0.7172	0.6639	0.8557
Before Correction	Low-Elevation Stations	32850	0.1280	3.5415	-0.8935	46.5542	18.7642	0.7959	0.3881	0.1544	0.1446	-0.0236	0.4171
After Correction	Mid-Elevation Stations	71175	0.8447	1.6404	0.6793	-15.1095	-7.3969	0.0000	0.6252	0.6252	0.7478	0.6988	0.8565
Before Correction	Mid-Elevation Stations	71175	0.1807	3.6394	-0.5787	29.2928	19.1835	0.7666	0.4463	0.1810	0.1881	0.0926	0.4814
After Correction	High-Elevation Stations	87600	0.8570	1.6441	0.7195	-16.6053	-7.1954	0.0000	0.6532	0.6532	0.7690	0.7250	0.8635
Before Correction	High-Elevation Stations	87600	0.1530	3.8050	-0.5025	12.6933	17.7806	0.7643	0.4305	0.1797	0.1816	0.1154	0.5148
After Correction	very-High-Elevation Stations	14235	0.8663	1.9372	0.7122	-10.3080	-6.8421	0.0000	0.6898	0.6898	0.7927	0.7518	0.8676
Before Correction	very-High-Elevation Stations	14235	0.2422	3.9918	-0.2221	-5.2822	21.6493	0.7470	0.4747	0.1977	0.1798	0.2181	0.5660

در مجموع، چارچوب پیشنهادی خطاهای سیستماتیک IMERG را به‌طور محسوسی کاهش داد؛ بااین‌حال، تفاوت عملکرد آن در بارش‌های بسیار ضعیف، رخدادهای نادر و ارتفاعات بالا نشان داد که تصحیح اریبی باید متناسب با شدت بارش و شرایط توپوگرافی انجام شود. بنابراین، بهبود شاخص‌های کلی به‌تنهایی برای تأیید کارایی روابط در تمام شرایط بارشی و مکانی کافی نیست.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اصلاح اریبی با تحلیل طیفی و توپوگرافی»

اعتبارسنجی متقابل مونت‌کارلو برای برآورد ضرایب و انتخاب مدل در تقسیم‌بندی‌های تصادفی داده‌های دوره مطالعه به کار رفت؛ بااین‌حال، پراکندگی نتایج تکرارها گزارش نشد و تعمیم زمانی روابط به دوره‌های آینده نیز ارزیابی نشده است. استفاده عملیاتی از روابط پیشنهادی مستلزم اعتبارسنجی در دوره‌ای زمانی مستقل است. همچنین، در صورت تغییر رژیم بارش، الگوریتم یا نسخه محصول، لازم است عملکرد روابط مجدداً ارزیابی و در صورت نیاز، ضرایب بازکالیبراسیون شوند. ضرایب تصحیح توسعه‌یافته ویژه محصول GPM-IMERG V07 Final Run و شرایط شمال‌غرب ایران هستند؛ ازاین‌رو، انتقال مستقیم آن‌ها به سایر محصولات یا مناطق بدون ارزیابی مستقل توصیه نمی‌شود. بااین‌حال، چارچوب تحلیل و تصحیح قابلیت استفاده در سایر مناطق و محصولات را دارد، مشروط بر آنکه آستانه‌ها و ضرایب با استفاده از داده‌های محصول موردنظر و مشاهدات زمینی منطقه هدف مجدداً برآورد و اعتبارسنجی شوند. داده‌های تصحیح‌شده باید مکمل شبکه باران‌سنجی تلقی شوند و کاربرد هیدرولوژیکی آن‌ها، به‌ویژه برای رخدادهای نادر و ارتفاعات بالا، با اعتبارسنجی در سطح حوضه و ارزیابی عدم‌قطعیت همراه باشد.

۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و توسعه چارچوبی منطقه‌ای برای تصحیح اریبی محصول GPM-IMERG V07 Final Run در شمال‌غرب ایران انجام شد. نتایج نشان داد که اریبی این محصول ثابت و همگن نیست و به زمان، شدت بارش، ارتفاع و موقعیت جغرافیایی وابسته است؛ بنابراین، یک ضریب تصحیح ثابت نمی‌تواند ناهمگنی مکانی و زمانی خطا را بازنمایی کند. چارچوب پیشنهادی با استفاده از روابط افزایشی، ضربی و ترکیبی متناسب با رفتار هر طبقه، امکان تصحیح هدفمند برآوردهای ماهواره‌ای را فراهم کرد.

در مقیاس کلی، ضریب همبستگی از 0.1659 در داده خام به 0.8532 پس از تصحیح افزایش یافت و RMSE از 3.7207 به 1.6288 میلی‌متر در روز کاهش پیدا کرد که معادل کاهش 56.22% خطاست. همچنین، NSE از 0.5436− به 0.7042 رسید. بهبود هم‌زمان این شاخص‌ها نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی علاوه بر کاهش خطای مقداری، بازنمایی تغییرات زمانی بارش را نیز به‌طور محسوسی ارتقا داده است. در شاخص‌های رخداد، POD از 0.4331 به 0.6370 و CSI از 0.1776 به 0.6370 افزایش یافت که بیانگر بهبود توانایی محصول در شناسایی رخدادهای بارشی است.

کارایی چارچوب در طبقات شدت بارش یکسان نبود. در بارش‌های متوسط، اریبی نسبی تقریباً به صفر رسید و در طبقات متوسط، سنگین و حدی، خطای مقداری کاهش یافت. در مقابل، در بارش‌های بسیار ضعیف، کاهش RMSE الزاماً با بهبود تشخیص رخداد همراه نبود. افزون بر این، طبقه سیل‌آسا، با تنها چهار نمونه، به دلیل نرسیدن به حداقل تعداد لازم برای کالیبراسیون تصحیح نشد؛ بنابراین، کارایی روش در این طبقه ارزیابی نشده است.

تحلیل ارتفاعی نشان داد که پس از تصحیح، CC در چهار طبقه ارتفاعی بین 0.8447 و 0.8663 قرار گرفت. بااین‌حال، بیشترین RMSE، برابر با 1.9372 میلی‌متر در روز، همچنان در مناطق بسیار مرتفع مشاهده شد که بیانگر باقی‌ماندن بخشی از خطاهای مرتبط با توپوگرافی است. همچنین، تغییر rBias از 20.86% در داده خام به 15.84 − % پس از تصحیح نشان داد که حذف بیش‌برآورد اولیه در برخی شرایط به

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

بیش‌تصحیح و کم‌برآوردی منجر شده است. بنابراین، بهینه‌سازی مدل باید علاوه بر کاهش خطا، حفظ حجم بارش و جلوگیری از بیش‌تصحیح را نیز مدنظر قرار دهد.

دستاورد اصلی این پژوهش، ارزیابی منطقه‌ای محصول IMERG V07 Final Run و بررسی کارایی روابط تصحیح آماری با لحاظ‌کردن تغییرات ماهانه، شدت بارش و مؤلفه‌های مکانی و ارتفاعی در شمال‌غرب ایران است. یافته‌ها، وابستگی ساختار خطا به این عوامل و بهبود انطباق برآوردهای تصحیح‌شده با مشاهدات زمینی را در مجموعه مورد مطالعه نشان می‌دهند. نتایج تصحیح به داده‌های توسعه مدل و طبقات شدت تعیین‌شده از مشاهدات زمینی مربوط‌اند؛ ارزیابی مستقل زمانی و مکانی، گام بعدی برای بررسی قابلیت انتقال این روابط است.

مقاله در نوبت انتشار

منابع

Amell, A., Hee, L., Pfreundschuh, S., & Eriksson, P. (2025). Probabilistic near-real-time retrievals of Rain over Africa using deep learning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *130*(20), e2025JD044595.

Andari, R., Nurhamidah, N., Daoed, D., & Marzuki. (2024). Evaluation of bias correction methods for multi-satellite rainfall estimation products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1317*(1), 12008.

Aslami, F., Ghorbani, A., Sobhani, B., & Esmali, A. (2019). Comprehensive comparison of daily IMERG and GSMaP satellite precipitation products in Ardabil Province, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, *40*(8), 3139–3153.

Baig, F., Ali, L., Faiz, M. A., Chen, H., & Sherif, M. (2025). From bias to accuracy: Transforming satellite precipitation data in arid regions with machine learning and topographical insights. *Journal of Hydrology*, *653*, 132801.

Bakhtar, A., Rahmati, A., Shayeghi, A., Teymoori, J., Ghajarnia, N., & Saemian, P. (2022). Spatio-temporal evaluation of GPM-IMERGV6. 0 final run precipitation product in capturing extreme precipitation events across Iran. *Water*, *14*(10), 1650.

Beck, Hylke E., Noemi Vergopolan, Ming Pan, Vincenzo Levizzani, Albert IJM Van Dijk, Graham P. Weedon, Luca Brocca, Florian Pappenberger, George J. Huffman, and E. F. W. (2017). Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*, 6201–6217. https://doi.org/10.5194/hess-21-6201-2017

Beck, H. E., Pan, M., Miralles, D. G., Reichle, R. H., Dorigo, W. A., Hahn, S., Sheffield, J., Karthikeyan, L., Balsamo, G., & Parinussa, R. M. (2020). Evaluation of 18 satellite-and model-based soil moisture products using in situ measurements from 826 sensors. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, *2020*, 1–35.

Beck, H. E., Van Dijk, A. I. J. M., Lehmann, J., & Wood, E. F. (2017). Global evaluation of precipitation products. *Hydrology and Earth System Sciences*.

Beck, H. E., Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., van Dijk, A. I. J. M., Weedon, G. P., Brocca, L., Pappenberger, F., Huffman, G. J., & Wood, E. F. (2017). Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. In *Satellite precipitation measurement: Volume 2* (pp. 625–653). Springer.

Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., Van Dijk, A. I. J. M., McVicar, T. R., & Adler, R. F. (2019). MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: Methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *100*(3), 473–500. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1

Benkirane, M., Amazirh, A., Laftouhi, N.-E., Khabba, S., & Chehbouni, A. (2023). Assessment of GPM

satellite precipitation performance after bias correction, for hydrological modeling in a semi-arid watershed (High Atlas Mountain, Morocco). *Atmosphere*, *14*(5), 794.

Bhuiyan, M. A. E., Yang, F., Biswas, N. K., Rahat, S. H., & Neelam, T. J. (2020). Machine learning-based error modeling to improve GPM IMERG precipitation product over the brahmaputra river basin. *Forecasting*, *2*(3), 248–266.

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, *28*(17), 6938–6959.

Caracciolo, D., Francipane, A., Viola, F., Noto, L. V., & Deidda, R. (2018). Performances of GPM satellite precipitation over the two major Mediterranean islands. *Atmospheric Research*, *213*, 309–322.

Da Silva, N. A., Webber, B. G. M., Matthews, A. J., Feist, M. M., Stein, T. H. M., Holloway, C. E., & Abdullah, M. F. A. B. (2021). Validation of GPM IMERG extreme precipitation in the Maritime Continent by station and radar data. *Earth and Space Science*, *8*(7), e2021EA001738.

Derin, Y., Anagnostou, E., Berne, A., Borga, M., Boudevillain, B., Buytaert, W., Chang, C.-H., Chen, H., Delrieu, G., & Hsu, Y. C. (2019). Evaluation of GPM-era global satellite precipitation products over multiple complex terrain regions. *Remote Sensing*, *11*(24), 2936.

Derin, Y., Bhuiyan, M. A. E., Anagnostou, E., Kalogiros, J., & Anagnostou, M. (2019). Evaluation of GPM-era global satellite precipitation products over complex terrain. *Remote Sensing*, *11*(24), 2935. https://doi.org/10.3390/rs11242935

Elsebaie, I. H., Kawara, A. Q., Alharbi, R., & Alnahit, A. O. (2025). Bias correction methods applied to satellite rainfall products over the western part of Saudi Arabia. *Atmosphere*, *16*(7), 772.

Fallah, A., Rakhshandehroo, G. R., Berg, P., O, S., & Orth, R. (2020). Evaluation of precipitation datasets against local observations in southwestern Iran. *International Journal of Climatology*, *40*(9), 4102–4116.

Farokhnia, A., Anvari, S., & Najafi, M. S. (2024). Assessing the Accuracy of Satellite and Reanalysis Precipitation in Iran, Focusing on Datasets with High Spatial Resolution. *Iran-Water Resources Research*, *20*(1), 68–89.

Gadelha, A. N., Coelho, V. H. R., Xavier, A. C., Barbosa, L. R., Melo, D. C. D., Xuan, Y., Huffman, G. J., Petersen, W. A., & Almeida, C. das N. (2019). Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales. *Atmospheric Research*, *218*, 231–244.

Gan, F., Zhang, X., Diao, X., Zhong, X., & Gao, Y. (2026). Error-Decomposition Machine Learning for IMERG Precipitation Correction in Karst Regions. *Water Resources Management*, *40*(5), 210.

Gebrechorkos, S. H., Leyland, J., Dadson, S. J., Cohen, S., Slater, L., Wortmann, M., Ashworth, P. J., Bennett, G. L., Boothroyd, R., & Cloke, H. (2023). Global scale evaluation of precipitation datasets for hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, *2023*, 1–33.

Ghajarnia, N., Liaghat, A., & Arasteh, P. D. (2015). Comparison and evaluation of high resolution precipitation estimation products in Urmia Basin-Iran. *Atmospheric Research*, *158*, 50–65.

Gheysouri, M., Kavian, A., Kalehhouei, M., Fernández-Raga, M., & Rodrigo-Comino, J. (2025). Evaluation of IMERG precipitation product in the investigation of drought events in the Kermanshah Province. *Acta Geophysica*, *73*(3), 2669–2682.

Gheysouri, M., Sigaroodi, S. K., Salajegheh, A., Choubin, B., & Liu, B. (2025). Orographic changes in precipitation using gradient-based IMERG data assessment in the Alborz Mountains, Iran. *Advances in Space Research*, *75*(11), 7800–7816.

Ghorbanian, A., Mohammadzadeh, A., Jamali, S., & Duan, Z. (2022). Performance Evaluation of Six Gridded Precipitation Products throughout Iran Using Ground Observations over the Last Two Decades (2000–2020). *Remote Sensing*, *14*(15), 3783.

Girard, A. (1989). A fast ‘Monte-Carlo cross-validation’procedure for large least squares problems with noisy data. *Numerische Mathematik*, *56*, 1–23.

Gu, J., Ye, Y., Guan, H., Zhou, Z., Cao, Y., & Jiang, Y. (2026). Has the latest IMERG V07 from GPM improved the performance of precipitation estimation of regional-scale compared to its predecessor?

Journal of Hydrology, 135114.
Guo, H., Tian, Y., Li, J., Guo, C., Meng, X., Wang, W., & De Maeyer, P. (2024). Has IMERG_V07 improved the precision of precipitation retrieval in Mainland China compared to IMERG_V06? *Remote Sensing*, *16*(14), 2671.
Habib, E., Krajewski, W. F., & Kruger, A. (2001). Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements. *Journal of Hydrologic Engineering*, *6*(2), 159–166.
Hashemi, H., Nordin, M., Lakshmi, V., Huffman, G. J., & Knight, R. (2017). Bias correction of long-term satellite monthly precipitation product (TRMM 3B43) over the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, *18*(9), 2491–2509.
Hosseini-Moghari, S.-M., & Tang, Q. (2020). Validation of GPM IMERG V05 and V06 precipitation products over Iran. *Journal of Hydrometeorology*, *21*(5), 1011–1037.
Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., & Iguchi, T. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *95*(5), 701–722. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1
Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., & Yoo, S.-H. (2015). NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version*, *4*(26), 30.
Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Joyce, R., Kelley, O. A., Nelkin, E. J., Portier, A., Stocker, E. F., Tan, J., Watters, D. C., & West, B. J. (2023). IMERG V07 release notes. *Goddard Space Flight Center: Greenbelt, MD, USA*, *1140*.
Jauhari, M. R., & Suhartanto, E. (2025). Evaluation of Statistical Bias Correction Methods for GPM Precipitation: Application in Gembong Watershed, Indonesia. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, *11*(11), 590–595.
Kawo, N. S., Hordofa, A. T., & Karuppannan, S. (2021). Performance evaluation of GPM-IMERG early and late rainfall estimates over Lake Hawassa catchment, Rift Valley Basin, Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(4), 256.
Keikhosravi-Kiany, M. S., & Balling Jr, R. C. (2024). Evaluation of GPM IMERG early, late, and final Run in representing extreme rainfall indices in Southwestern Iran. *Remote Sensing*, *16*(15), 2779.
Kidd, C., Becker, A., Huffman, G. J., Muller, C. L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., & Kirschbaum, D. B. (2017). So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98*(1), 69–78.
Kidd, C., & Huffman, G. (2011). Precipitation in the Mediterranean: Satellite evaluation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
Kidd, C., Huffman, G., Maggioni, V., Chambon, P., & Oki, R. (2021). The global satellite precipitation constellation: Current status and future requirements. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *102*(10), E1844–E1861.
Kidd, C., & Levizzani, V. (2011). Satellite precipitation products for climate modeling. *Surveys in Geophysics*.
Kidd, C., Takayabu, Y. N., Skofronick-Jackson, G. M., Huffman, G. J., Braun, S. A., Kubota, T., & Turk, F. J. (2020). The global precipitation measurement (GPM) mission. In *Satellite Precipitation Measurement: Volume 1* (pp. 3–23). Springer.
Kim, T., Yang, T., Zhang, L., & Hong, Y. (2022). Near real-time hurricane rainfall forecasting using convolutional neural network models with Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) product. *Atmospheric Research*, *270*, 106037.
Kochendorfer, J., Rasmussen, R., Wolff, M., Baker, B., Hall, M. E., Meyers, T., Landolt, S., Jachcik, A., Isaksen, K., & Brækkan, R. (2017). The quantification and correction of wind-induced precipitation measurement errors. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(4), 1973–1989.
Koutsouris, A. J., Chen, D., & Lyon, S. W. (2016). Comparing global precipitation data sets in eastern Africa: a case study of Kilombero Valley, Tanzania. *International Journal of Climatology*, *36*(4), 2000–2014.
Leivadiotis, E., & Psilovikos, A. (2025). A performance evaluation and statistical analysis of IMERG

precipitation products during Medicane Daniel (September 2023) in the Thessaly Plain, Greece. *Water*, *17*(16), 2401.
Levizzani, V., Kidd, C., Kirschbaum, D. B., Kummerow, C. D., Nakamura, K., & Turk, F. J. (2020). *Satellite precipitation measurement*. Springer.
Li, H., Zhang, Y., Lei, H., & Hao, X. (2023). Machine learning-based bias correction of precipitation measurements at high altitude. *Remote Sensing*, *15*(8), 2180.
Liu, Z., Hou, H., Zhang, L., & Hu, B. (2022). Event-based bias correction of the GPM IMERG V06 product by random forest method over Mainland China. *Remote Sensing*, *14*(16), 3859.
Lufira, R. D., Suhartanto, E., Andawayanti, U., Asmaranto, R., & Utami, R. T. (2026). A Comparative Assessment of Advanced Bias Correction Methods for GPM IMERG in Banjir Kanal Timur Watershed. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *16*(1), 32097–32103.
Maggioni, V., & Massari, C. (2018). A review of error characteristics of satellite precipitation products. *Remote Sensing of Environment*.
Maghsood, F. F., Hashemi, H., Hosseini, S. H., & Berndtsson, R. (2019). Ground validation of GPM IMERG precipitation products over Iran. *Remote Sensing*, *12*(1), 48.
Mahdavi, T. (2023). Comparison of Two Products of Satellite Precipitation (TRMM_3B42 v7-3-Hourly—Research Grade) and GPM-IMERG (V06-Half-Hourly—Early) in the East of Lake Urmia, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *51*(1), 43–60.
Mahmoud, M. T., Al-Zahrani, M. A., & Sharif, H. O. (2018). Assessment of global precipitation measurement satellite products over Saudi Arabia. *Journal of Hydrology*, *559*, 1–12.
Mahmoud, M. T., Hamouda, M. A., & Mohamed, M. M. (2019). Spatiotemporal evaluation of the GPM satellite precipitation products over the United Arab Emirates. *Atmospheric Research*, *219*, 200–212.
Massari, C., Crow, W., & Brocca, L. (2017). An assessment of the performance of global rainfall estimates without ground-based observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(9), 4347–4361.
Moravej, M. (2020). Ground validation and bias correction of GPM-IMERG V6 satellite precipitation product over Sweden. *TVVR20/5020*.
Najafi, M. S., Alizadeh, O., & Sauter, T. (2025). Evaluation of gridded precipitation datasets over Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *58*, 102234.
Nakamura, K. (2021). Progress from TRMM to GPM. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, *99*(3), 697–729.
Nguyen, N. Y., Anh, T. N., Nguyen, H. D., & Dang, D. K. (2024). Quantile mapping technique for enhancing satellite-derived precipitation data in hydrological modelling: a case study of the Lam River Basin, Vietnam. *Journal of Hydroinformatics*, *26*(8), 2026–2044.
Nongmaithem, L. C., Hinge, G., Kumar, A., & Hamouda, M. A. (2025). Enhancing IMERG precipitation estimates using machine learning and bias correction across elevation zones in India. *Hydrological Sciences Journal*, *70*(14), 2560–2574.
Nozarpour, N., Mahjoobi, E., & Golian, S. (2024). Assessment of Satellite-based Precipitation Products in Monthly, Seasonal, and Annual Time-Scale over Iran. *International Journal of Environmental Research*, *18*(5), 76.
Papacharalampous, G., Tyralis, H., Doulamis, N., & Doulamis, A. (2023). Ensemble learning for blending gridded satellite and gauge-measured precipitation data. *Remote Sensing*, *15*(20), 4912.
Pourentezari, S., Salehi, H., Haghighi, A. R., Sadeghi, M., & Faridhosseini, A. (2025). Towards accurate flood forecasting: integrating satellite data, hydrological modeling, and deep learning. *Journal of Flood Risk Management*, *18*(4), e70155.
Prakash, S. (2019). Performance assessment of CHIRPS, MSWEP, SM2RAIN-CCI and TMPA precipitation products across India. *Journal of Hydrology*, *571*, 50–59.
Prakash, S., Mitra, A. K., AghaKouchak, A., Liu, Z., Norouzi, H., & Pai, D. S. (2018). A preliminary assessment of GPM-based multi-satellite precipitation estimates over a monsoon dominated region. *Journal of Hydrology*, *556*, 865–876.

Ramadhan, R., Marzuki, M., Suryanto, W., Sholihun, S., Yusnaini, H., Hashiguchi, H., & Shimomai, T. (2024). Bias correction of IMERG data in the mountainous areas of Sumatra based on a single gauge observation. *Trends in Sciences*, *21*(4), 7592.

Saghiry, S., Loudyi, D., Laassilia, O., Arshad, A., Dhaouadi, L., Ali, R., & Alaoui, M. El. (2025). Towards More Reliable Gridded Precipitation Estimates: Gauge-Based Multi-Scale Evaluation and Machine Learning Bias Correction. *Earth Systems and Environment*, 1–29.

Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., De Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R. Q., Jobbagy, E., Kebede, S., & Kolusu, S. R. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, *4*(2), 87–101.

Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. Di, Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., & Lewis, S. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1513–1766.

Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz-Sánchez, M. Á., & Luis, M. de. (2018). *Recent trends reveal decreasing intensity of daily precipitation in Spain*.

Sevruk, B., Ondrás, M., & Chvíla, B. (2009). The WMO precipitation measurement intercomparisons. *Atmospheric Research*, *92*(3), 376–380.

Sharifi, E., Steinacker, R., & Saghafian, B. (2016). Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results. *Remote Sensing*, *8*(2), 135.

Skofronick-Jackson, G., Berg, W., Kidd, C., Kirschbaum, D. B., Petersen, W. A., Huffman, G. J., & Takayabu, Y. N. (2018). Global precipitation measurement (GPM): Unified precipitation estimation from space. In *Remote sensing of clouds and precipitation* (pp. 175–193). Springer.

Skofronick-Jackson, G., Petersen, W. A., Berg, W., Kidd, C., Stocker, E. F., Kirschbaum, D. B., Kakar, R., Braun, S. A., Huffman, G. J., & Iguchi, T. (2017). The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98*(8), 1679–1695.

Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D., Petersen, W., Huffman, G., Kidd, C., Stocker, E., & Kakar, R. (2018). The Global Precipitation Measurement (GPM) mission's scientific achievements and societal contributions: Reviewing four years of advanced rain and snow observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *144*, 27–48.

Smith, E. A., Asrar, G., Furuhama, Y., Ginati, A., Mugnai, A., Nakamura, K., Adler, R. F., Chou, M.-D., Desbois, M., & Durning, J. F. (2007). International global precipitation measurement (GPM) program and mission: An overview. *Measuring Precipitation from Space: EURAINSAT and the Future*, 611–653.

Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, *56*(1), 79–107.

Sun, W., Sun, Y., Li, X., Wang, T., Wang, Y., Qiu, Q., & Deng, Z. (2018). Evaluation and correction of GPM IMERG precipitation products over the capital circle in Northeast China at multiple spatiotemporal scales. *Advances in Meteorology*, *2018*, 1–14.

Sungmin, O., Foelsche, U., Kirchengast, G., Fuchsberger, J., Tan, J., & Petersen, W. A. (2017). Evaluation of GPM IMERG Early, Late, and Final rainfall estimates using WegenerNet gauge data in southeastern Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(12), 6559–6572. https://doi.org/10.5194/hess-21-6559-2017

Taghizadeh, E., Ahmadi-Givi, F., Brocca, L., & Sharifi, E. (2021). Evaluation of satellite/reanalysis precipitation products over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, *42*(9), 3474–3497.

Tan, J., Huffman, G. J., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2019). Diurnal cycle of IMERG V06 precipitation. *Geophysical Research Letters*, *46*(22), 13584–13592.

Tan, J., Huffman, G. J., & Song, Y. (2024). Automated quality control scheme for GPM satellite precipitation products. *Geophysical Research Letters*, *51*(17), e2024GL108963.

Tan, J., Petersen, W. A., & Tokay, A. (2016). A novel approach to identify sources of errors in IMERG for GPM ground validation. *Journal of Hydrometeorology*, *17*(9), 2477–2491.
Tang, G. (2020). Characterization of the systematic and random errors in satellite precipitation using the multiplicative error model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *59*(7), 5407–5416.
Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., & Hong, Y. (2020). Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sensing of Environment*, *240*, 111697.
Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., Hong, Y., & Lettenmaier, D. P. (2020). Have satellite precipitation products improved over the past two decades? A comprehensive comparison. *Journal of Hydrology*, *581*, 124376.
Tang, G., Zeng, Z., Long, D., Guo, X., Yong, B., Zhang, W., & Hong, Y. (2016). Statistical and hydrological comparisons between TRMM and GPM level-3 products over a midlatitude basin: Is day-1 IMERG a good successor for TMPA 3B42V7? *Journal of Hydrometeorology*, *17*(1), 121–137.
Tang, S., Li, R., & He, J. (2021). Modeling and evaluating systematic and random errors in multiscale GPM IMERG summer precipitation estimates over the Sichuan Basin. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *14*, 4709–4719.
Tapiador, F. J., Navarro, A., Garcia-Ortega, E., Merino, A., Sánchez, J. L., Marcos, C., & Kummerow, C. (2020). The contribution of rain gauges in the calibration of the IMERG product: Results from the first validation over Spain. *Journal of Hydrometeorology*, *21*(2), 161–182.
Tapiador, F. J., Navarro, A., Levizzani, V., García-Ortega, E., Huffman, G. J., Kidd, C., Kucera, P. A., Kummerow, C. D., Masunaga, H., & Petersen, W. A. (2017). Global precipitation measurements for validating climate models. *Atmospheric Research*, *197*, 1–20.
Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Leuprecht, A. (2011). Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, *31*(10), 1530–1544.
Wang, J., Petersen, W. A., & Wolff, D. B. (2021). Validation of satellite-based precipitation products from TRMM to GPM. *Remote Sensing*, *13*(9), 1745.
Wang, L., Chen, H., Chen, Y.-L., Xie, P., Chen, C.-R., & Liao, T. (2023). Towards bias correction of satellite precipitation retrievals in complex regions with deep learning: A case study over taiwan. *IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3803–3806.
Wang, W., Jiang, Y., Yu, B., Zhang, X., Xie, Y., & Yin, B. (2024). Evaluation of GPM IMERG-FR product for computing rainfall erosivity for Mainland China. *Remote Sensing*, *16*(7), 1186.
Wang, Y., Wang, N., & Li, X. (2026). How precipitation phase affects the accuracy of IMERG satellite precipitation products in mainland China? *Atmospheric Research*, 108902.
Watters, D., & Battaglia, A. (2021). The NASA-JAXA Global Precipitation Measurement mission–part I: New frontiers in precipitation. *Weather*, *76*(2), 41–44.
Watters, D. C., Gatlin, P. N., Bolvin, D. T., Huffman, G. J., Joyce, R., Kirstetter, P., Nelkin, E. J., Ringerud, S., Tan, J., & Wang, J. (2024). Oceanic validation of IMERG-GMI version 6 precipitation using the GPM validation network. *Journal of Hydrometeorology*, *25*(1), 125–142.
Watters, D. C., Huffman, G. J., Gatlin, P. N., Kirstetter, P.-E., Bolvin, D. T., Joyce, R., Nelkin, E. J., Tan, J., & Wolff, D. B. (2025). A diagnosis of oceanic precipitation in IMERG-GMI. *Journal of Hydrometeorology*, *26*(4), 459–480.
Wei, L., Jiang, S., Ren, L., Zhang, L., Wang, M., Liu, Y., & Duan, Z. (2022). Bias correction of GPM IMERG Early Run daily precipitation product using near real-time CPC global measurements. *Atmospheric Research*, *279*, 106403.
Xiang, Y., Chen, J., Li, L., Peng, T., & Yin, Z. (2021). Evaluation of eight global precipitation datasets in hydrological modeling. *Remote Sensing*, *13*(14), 2831.
Xu, R., Tian, F., Yang, L., Hu, H., Lu, H., & Hou, A. (2017). Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 rainfall products over southern Tibetan Plateau based on a high-density rain gauge

network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(2), 910–924.
Yang, X., Yang, S., Tan, M. L., Pan, H., Zhang, H., Wang, G., He, R., & Wang, Z. (2022). Correcting the bias of daily satellite precipitation estimates in tropical regions using deep neural network. *Journal of Hydrology*, *608*, 127656.
Yeggina, S., Teegavarapu, R. S. V, & Muddu, S. (2020). Evaluation and bias corrections of gridded precipitation data for hydrologic modelling support in Kabini River basin, India: S. Yeggina et al. *Theoretical and Applied Climatology*, *140*(3), 1495–1513.
Yong, B., Chen, B., Tian, Y., Yu, Z., & Hong, Y. (2016). Error-component analysis of TRMM-based multi-satellite precipitation estimates over mainland China. *Remote Sensing*, *8*(5), 440.
Yong, B., Liu, D., Gourley, J. J., Tian, Y., Huffman, G. J., Ren, L., & Hong, Y. (2015). Global view of real-time TRMM multisatellite precipitation analysis: Implications for its successor global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *96*(2), 283–296.
Zhu, S., Li, Z., Chen, M., Wen, Y., Gao, S., Zhang, J., Wang, J., Nan, Y., Ferraro, S. C., & Tsoodle, T. E. (2024). How has the latest IMERG V07 improved the precipitation estimates and hydrologic utility over CONUS against IMERG V06? *Journal of Hydrology*, *645*, 132257.

مقاله مروری انتشار
نشریه علمی پژوهشی

Bias Correction of the GPM-IMERG V07 Final Run Satellite-Based Precipitation Product over Northwestern Iran

Abstract

Satellite precipitation products are important sources of rainfall information in regions with sparse ground-based monitoring networks; however, their performance may be affected by precipitation intensity, temporal variability, and topographic conditions. This study aimed to evaluate the GPM-IMERG V07 Final Run product and develop a regional bias-correction framework for northwestern Iran. Daily IMERG estimates from 1 January 2021 to 31 December 2023 were compared with observations from 188 rain-gauge stations. The error structure was examined at monthly and seasonal scales and across different precipitation-intensity and elevation classes. Based on the identified error patterns, additive, multiplicative, and combined correction relationships were developed according to time, precipitation intensity, and spatial conditions. Monte Carlo cross-validation was used for coefficient estimation and model selection. The uncorrected product showed limited ability to reproduce the temporal variability of observed precipitation, with a correlation coefficient of 0.1659 and a daily RMSE of 3.7207 mm day^{-1}. Following bias correction, the correlation coefficient increased to 0.8532, RMSE decreased to 1.6288 mm day^{-1}, and the Nash–Sutcliffe efficiency increased from -0.5436 to 0.7042. Event-based metrics also indicated fewer false alarms and improved precipitation detection. The magnitude of improvement varied among precipitation-intensity classes. For moderate and heavy precipitation, RMSE decreased and relative bias approached zero. In contrast, the detection of very light precipitation remained limited. Bias correction also reduced

performance differences along the elevation gradient, although residual topography-related errors and underestimation remained in some classes. The torrential precipitation class contained only four samples and was therefore not corrected; the effectiveness of the correction method was not evaluated for this class. Overall, the proposed framework substantially improved the consistency of IMERG V07 estimates with ground observations by accounting for the temporally, intensity-, and location-dependent nature of the errors. The corrected estimates can complement rain-gauge observations in regional hydro-climatological and hydrological studies. Nevertheless, independent validation over longer periods is required to assess the temporal and spatial transferability of the framework.

Keywords: GPM-IMERG V07 Final Run; Bias correction; Satellite precipitation; Precipitation intensity; Topography; Northwestern Iran; Rain – Gauge observations; Spatial heterogeneity.

مقاله در نوبت انتشار

نشریه علمی پژوهشی

« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »