



Assessing the Accuracy of Satellite and Reanalysis Precipitation in Iran, Focusing on Datasets with High Spatial Resolution

A. Farokhnia^{1*}, S. Anvari², and M.S. Najafi³

Abstract

Precipitation, as one of the main components of the hydrological cycle, plays a significant role in the processes related to water resources management, environmental protection, and weather disaster management. Due to lack of or limited access to widespread rainfall data in the country, the use of global rainfall data obtained from remote sensing and modeling can be very useful in analyzes required in the field of water resources management. This paper evaluates the accuracy of the latest global precipitation databases resulting from reanalysis and satellite data with high spatial resolution (ERA5-Land, GSMaP, IMERG, MSWEP and CHIRPS) in estimating precipitation at different time scales in Iran. For this purpose, rainfall data in 70 synoptic stations in the country were used for the period of 2000 to 2018, and the performance of the databases in question was investigated at daily, monthly and annual time scales, separately for 6 different climatic regions. The results showed that the rainfall estimation in these databases is more accurate for the rainiest regions of the country than the dry regions, and generally the accuracy of the rainfall estimation is higher in the rainy months of the year than in the dry period of the year. In general, better performance was recorded by the GSMaP database in estimating daily rainfall and by the MSWEP database in estimating monthly and annual rainfall in Iran compared to other databases; However, the accuracy of each database depends on the desired time scale and the climatic region under investigation, which must be taken into account.

Keywords: Satellite and Reanalysis Precipitation, ERA5-Land, GSMaP, IMERG, MSWEP.

Received: February 10, 2024

Accepted: March 24, 2024

ارزیابی دقت پایگاه‌های اطلاعات ماهواره‌ای و بازتحلیلی بارش در ایران با تمرکز بر پایگاه‌های با تفکیک مکانی بالا

اشکان فرخ‌نیا^{۱*}، صدیقه انوری^۲ و محمدسعید نجفی^۳

چکیده

بارش به عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی چرخه هیدرولوژی، نقش به‌سزایی در فرآیندهای مرتبط با مدیریت منابع آب، حفاظت از شرایط زیست-محیطی و همچنین مدیریت بلایای آب و هوایی دارد. با توجه به کمبود و دسترسی محدود به داده‌های بارشی گسترده در سطح کشور، استفاده از داده‌های بارش جهانی حاصل از تحلیل‌های سنجش از دوری و مدل‌سازی می‌تواند در تحلیل‌های مورد نیاز حوزه مدیریت آب بسیار مفید باشد. تحقیق حاضر به ارزیابی دقت جدیدترین پایگاه‌های داده بارش جهانی حاصل از بازتحلیل و اطلاعات ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا (شامل ERA5-Land، GSMaP، IMERG، MSWEP و CHIRPS) در برآورد بارش در مقیاس‌های مختلف زمانی در سطح ایران می‌پردازد. برای این منظور، از داده‌های بارش در ۷۰ ایستگاه سینوپتیک در کشور برای بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ استفاده شد و عملکرد پایگاه‌های مورد نظر در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه به تفکیک ۶ منطقه مختلف اقلیمی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تخمین بارش در این پایگاه‌ها برای مناطق پربارش‌تر کشور دقت بالاتری نسبت به مناطق خشک دارد و عموماً دقت تخمین بارش در ماه‌های پربارش سال بیشتر از دوره خشک سال است. در مجموع پایگاه GSMaP در برآورد بارش روزانه و پایگاه MSWEP در تخمین بارش‌های ماهانه و سالانه در سطح ایران عملکرد بهتری از سایر پایگاه‌ها نشان می‌دهند؛ اما دقت هر پایگاه اطلاعاتی به مقیاس زمانی اطلاعات و منطقه اقلیمی مورد بررسی نیز وابستگی دارد که ضروری است در بهره‌برداری از این پایگاه‌ها مد نظر قرار داشته باشد.

کلمات کلیدی: بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل، ERA5-Land، GSMaP، IMERG، MSWEP.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱/۵

1- Assistant Professor, Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. Email: a.farokhnia@kgut.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. Email: s.anvari@kgut.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran. Email: ms.najafi@wri.ac.ir

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2024.442656.2741](https://doi.org/10.22034/IWRR.2024.442656.2741)

۱- استادیار پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

۲- استادیار پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

۳- استادیار پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۳ امکانپذیر است.



2000). در توسعه بسیاری از این داده‌ها، تلفیق و اصلاح برآوردهای ماهواره‌ای بارش با مقادیر ثبت شده در شبکه ایستگاه‌های زمینی برای افزایش دقت محصولات نهایی مد نظر قرار داشته و به رویه متداول توسعه اینگونه اطلاعات بدل شده است (Sun et al., 2018). به کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی عددی، رویکرد مهم دیگر در تولید اطلاعات یکپارچه مکانی بارش است. بدین منظور از بازتحلیل^۵ که یک روش علمی برای تلفیق داده‌های مشاهدات زمینی و ماهواره‌ای آب و هواشناسی با خروجی‌های مدل‌های عددی شبیه‌سازی آب و هوا است، استفاده می‌شود که امکان تولید مجموعه اطلاعات اقلیمی ارتقاء یافته از نظر کمی و کیفی برای دوره‌های زمانی طولانی مدت را فراهم می‌نماید (Saha et al., 2010).

با توجه به قابلیت مناسب اطلاعات بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل به دلیل پوشش برخی از ضعف‌های مهم موجود در داده‌های بارش ایستگاهی، امکان مناسبی در انجام تحلیل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی فراهم می‌نمایند. با این حال، این داده‌ها حاصل اندازه‌گیری مستقیم نبوده و از برآورد و شبیه‌سازی به دست آمده‌اند و از این رو همواره با خطا روبرو هستند. بررسی‌های انجام شده در خصوص دقت این محصولات توسط محققین مختلف در مناطق گوناگون کره زمین نشان می‌دهد خطاهای گوناگونی در مقادیر وجود دارد که ناشی از عوامل مختلف، نظیر موقعیت منطقه، فصل، کلاس رویدادهای بارش و فازه‌های متفاوت بارش است (Xie et al., 2022). لذا ارزیابی دقت و اعتمادپذیری این اطلاعات پیش از به کارگیری در هر مورد کاربردی ضروری است که این امر موضوع تحقیقات متعددی بوده است. Tang et al. (2016) et al. اطلاعات دقت بارش مجموعه IMERG V04 را در سطح کشور چین بررسی نمودند که نتایج نشان دهنده دقت مناسب داده‌های IMERG در اکثر نواحی بود، هرچند در نواحی خشک دقت این اطلاعات چندان مناسب ارزیابی نشد. برخی از تحقیقات انجام شده در خصوص دقت اطلاعات بارش IMERG نشان دهنده بیش‌برآورد وقایع بارشی خفیف و کم‌برآوردی وقایع بارشی شدید در این پایگاه اطلاعاتی بوده است (Li et al., 2022; Tan et al., 2016) که همین موضوع برای بارش ارائه شده در پایگاه ERA5 نیز در سطح استرالیا گزارش شده است (Sharifi et al., 2019). اثر توپوگرافی بر دقت تخمین بارش در برآوردهای مبتنی بر اطلاعات ماهواره‌ای نیز موضوع برخی از تحقیقات بوده است که نشان دادند میزان خطای موجود در برآوردهای بارش ماهواره‌ای می‌تواند با تغییرات ارتفاعی مرتبط باشد، اما جهت و شدت این ارتباط بسته به شرایط هر منطقه متفاوت است (Gentilucci et al., 2022; Mayor et al., 2017; Xu et al., 2017).

بارش یکی از اجزای اساسی چرخه آب در سامانه اقلیمی کره زمین است و مهم‌ترین و پویاترین مؤلفه مرتبط با گردش جو در مطالعات اقلیمی به شمار می‌رود (Kidd and Huffman, 2011). از این رو، در اختیار داشتن اطلاعات دقیق و قابل اعتماد بارش، نه تنها برای مطالعه روندها، تغییرات بلندمدت شرایط اقلیمی و تغییر اقلیم مفید است، بلکه در حوزه‌های دیگری نظیر مدیریت منابع آب، پیش‌شرایط زیست‌محیطی و همچنین مدیریت بلایای آب و هوایی از اهمیت بسزایی برخوردار است (Hartmann et al., 2016; Kirschbaum et al., 2017; Saouabe et al., 2022). اندازه‌گیری و ثبت میزان بارش در ایستگاه‌های زمینی، روش متداول و سنتی تولید اطلاعات مربوط به بارش به شمار می‌رود که دقیق‌ترین اطلاعات بارش در مقیاس مکانی نقطه‌ای را به دست می‌دهد (Lanza and Stagi, 2008). اما به دلیل تغییرات مکانی-زمانی شدید بارش، تولید اطلاعات دقیق و یکپارچه مکانی از آن بر اساس اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی نیازمند وجود یک شبکه ایستگاهی متراکم است که در بسیاری از نقاط جهان، نظیر پهنه‌های آبی، مناطق کوهستانی و همچنین در سطح کشورهای کمتر توسعه یافته، معمولاً در دسترس نیست (Zhang et al., 2020).

در دهه‌های اخیر با پیشرفت دانش، ارتقای مدل‌های شبیه‌سازی متغیرهای آب و هوایی از یک سو و توسعه فناوری سنجش از دور و امکانات پیشی مبتنی بر آن از سوی دیگر، تولید اطلاعات بارش در گستره‌های مکانی وسیع را ممکن ساخته است (Xie et al., 2022). کم بودن هزینه تولید این اطلاعات به ویژه برای سطوح مکانی وسیع و نیز امکان استخراج اطلاعاتی با پیوستگی مکانی و زمانی مناسب، از مزیت‌های مهم این رویکردها در قیاس با شبکه ایستگاه‌های زمینی است (WMO, 2012). با رصد تابش منعکس شده و یا ساطع شده از بخش‌های مختلف سامانه اقلیمی کره زمین توسط ماهواره‌ها و انجام پردازش‌های سنجش از دوری، می‌توان بارش را برآورد نمود (Iguchi et al., 2000). بر این اساس، تلاش‌های متعددی برای تولید مجموعه اطلاعات بارشی در مقیاس جهانی با استفاده از این رویکرد صورت گرفته که از جمله آن‌ها می‌توان به مجموعه داده‌های تحلیل بارش چند ماهواره‌ای ماموریت اندازه‌گیری بارندگی حاره‌ای^۱ (TRMM-TMPA)، نقشه‌برداری جهانی بارش^۲ (GSMaP)، الگوریتم تحلیل شکل‌گیری بارش مرکز پیش‌بینی آب و هوا^۳ (CMORPH) و برآورد بارش از اطلاعات سنجش از راه دور با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴ (PERSIANN) اشاره نمود (Huffman et al., 2007; Joyce et al., 2004; Kubota et al., 2007; Sorooshian et al.,

اصلاح خطاهای موجود می‌تواند موجب افزایش دقت این محصولات شود. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد که اطلاعات بارش پایگاه‌های ماهواره‌ای نزدیک به زمان واقعی دارای بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی بسیار زیاد هستند.

همانطور که در بررسی سوابق تحقیق ملاحظه می‌شود، موضوع ارزیابی دقت محصولات بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل جهانی جهت بررسی امکان به‌کارگیری آن‌ها در مطالعات و کاربردهای مختلف، خصوصاً برای مناطق فاقد شبکه ایستگاه‌های مناسب، از موضوعاتی است که مورد توجه جدی جامعه علمی قرار دارد. دلیل این امر، علاوه بر نیاز جدی به تقویت اطلاعات پایه آب و هواشناسی با توجه به بحران‌های اقلیمی پیش رو، توسعه روزمره امکانات ماهواره‌ای و رویکردهای مدل‌سازی است که منجر به ارائه مستمر اطلاعات جدید با مشخصات بهبود یافته شده است. مهم‌ترین این بهبودها، افزایش تفکیک مکانی اطلاعات بارش است که ظرفیت آن‌ها را برای استفاده عملیاتی در کاربردهای هیدرولوژیکی در مقیاس‌های مکانی کوچک افزایش می‌دهد. لذا هدف تحقیق حاضر، ارزیابی جدیدترین پایگاه‌های اطلاعات بارش جهانی با قدرت تفکیک مکانی بالا (بهتر از ۱۰ کیلومتر مسطحاتی) در برآورد بارش در مقیاس‌های مختلف زمانی در سطح ایران است. همچنین، ارزیابی ظرفیت این اطلاعات در برآورد بارش به تفکیک مناطق مختلف اقلیمی در سطح کشور نیز موضوع بررسی قرار گرفته است.

۲- داده‌ها و روش‌ها

۲-۱- داده‌های مشاهداتی

کشور ایران بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی قرار گرفته است. مهم‌ترین ویژگی‌های جغرافیایی کشور، قرار گرفتن دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب کشور و وجود دو رشته کوه البرز در بخش‌های شمالی و زاگرس در غرب کشور است که در کنار دو کویر بزرگ لوت و دشت کویر موجب تنوع آب و هوایی گسترده‌ای در سطح ایران گردیده‌اند (Ghalami et al., 2022). پربارش‌ترین منطقه ایران در نواحی ساحلی دریای خزر با متوسط بیش از ۲۰۰۰ میلی‌متر بارش سالانه و کم‌بارش‌ترین ناحیه در مناطق شرقی کشور با بارش کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال قرار دارند (Kaboli et al., 2021). برای انجام بررسی‌های مورد نظر در تحقیق حاضر، اطلاعات بارش ۷۰ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در سطح کشور در یک دوره زمانی ۱۹ ساله بین سال‌های ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۸ مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه

در ایران نیز تحقیقات متعددی برای بررسی دقت محصولات بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل صورت گرفته است. (Alijanian et al. (2017) پنج محصول بارش ماهواره‌ای، شامل CMORPH، PERSIANN، PERSIANN-CDR^۶، TRMM و MSWEP^۷ را برای یک دوره آماری ۱۰ ساله (۲۰۰۳-۲۰۱۲) با مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی در سطح کشور مقایسه نمودند. نتایج نشان داد MSWEP، PERSIANN-CDR و TRMM ظرفیت مناسبی در تفکیک روزهای بارندگی از غیر بارندگی دارند و داده‌های PERSIANN-CDR از بهترین دقت برای برآورد بارش‌های شدید برخوردار هستند. همچنین، نتایج این تحقیق نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه دقت این پایگاه‌های اطلاعاتی در برآورد بارش روزانه مناطق مختلف کشور بود. (Chavoshian and Katirai-Boroujerdy (2019) داده‌های ارائه شده در ۷ پایگاه اطلاعاتی جهانی بارش، شامل دو پایگاه مبتنی بر درون‌یابی بارش ایستگاهی (APHRODITE و CRU)، دو پایگاه مبتنی بر اطلاعات ماهواره‌ای (CMORPH و PERSIANN) و ۳ پایگاه ترکیبی اطلاعات ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای (TRMM، GPCP و PERSIANN-CDR) را برای یک دوره ۵ ساله (۲۰۰۷-۲۰۰۳) در سطح ایران مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده اختلاف بسیار زیاد بین مقدار بارش ارائه شده توسط این پایگاه‌ها بود، به نحوی که متوسط بارش در سطح کشور بین پایگاه‌های مذکور در دوره زمانی مورد بررسی بین ۱۸۰ تا ۲۶۰ میلی‌متر متغیر بوده است. همچنین، این تحقیق نشان داد که خطای پایگاه‌های اطلاعاتی مبتنی بر صرفاً تصاویر ماهواره‌ای خصوصاً در برآورد بارش‌های بهاره زیاد است و مجموعاً نیز تخمین این پایگاه‌ها از مقدار بارش با کم‌برآوردی همراه بوده است. تحقیق مذکور نتیجه‌گیری نموده که برآوردهای بارش ماهواره‌ای اصلاح شده با اطلاعات ایستگاه‌های زمینی برآوردهای بسیار مناسبتری در خصوص بارش به دست می‌دهد. (Najafi and Akbari Moghadam Sani (2022) دقت چهار پایگاه اطلاعاتی بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل IMERG، PDIR^۸، TRMM و ERA5^۹ را در برآورد خصوصیات بارش روزانه ۱۴۵ ایستگاه هواشناسی در سطح ایران برای یک دوره ۱۸ ساله (۲۰۰۰-۲۰۱۷) بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد در مجموع اطلاعات بارش IMERG از دقت بهتری نسبت به سایر موارد برخوردار می‌باشد، هرچند در برخی از مناطق اقلیمی مورد بررسی، مقادیر بارش ارائه شده توسط ERA5 بهتر بوده است. (Dehaghani et al. (2023) دقت دو پایگاه اطلاعات بارش ماهواره‌ای نزدیک به زمان واقعی (PERSIANN-CCS^{۱۰} و TRMM) را با یک پایگاه بارش ماهواره‌ای پس پردازش شده با اطلاعات زمینی (CMORPH) در ۵۲ ایستگاه هواشناسی در سطح کشور مقایسه نمودند و نشان دادند که

۲-۲- داده‌های بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل

پایگاه‌های اطلاعات بارش جهانی، شامل داده‌های بازتحلیل ERA5- Land و ماهواره‌ای شامل CHIRPS, GSMaP, MSWEP و IMERG برای ارزیابی در این تحقیق در نظر گرفته شد. ویژگی مهم این اطلاعات، بالا بودن تفکیک مکانی آن‌ها نسبت به سایر اطلاعات مشابه است. همچنین، این مجموعه اطلاعات علاوه بر اینکه برای دوره‌های زمانی نسبتاً طولانی در اختیار هستند، به‌طور مستمر مورد بروزرسانی قرار گرفته و از این رو برای کاربردهای نزدیک به زمان واقعی نیز قابل استفاده هستند.

اطلاعات برخی از پایگاه‌های بارش جهانی مورد نظر در تحقیق تنها به‌صورت روزانه و بر اساس تجمع بارش ۲۴ ساعته بر اساس ساعت هماهنگ جهانی^{۱۱} (UTC) ارائه می‌شود، اطلاعات بارش روزانه در ایستگاه‌های موردنظر با تجمع داده‌های ۶ ساعته مربوط به ساعت‌های ۶، ۱۲، ۱۸ و ۰ روز بعد برای هر روز محاسبه شد. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر شرایط اقلیمی بر دقت پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی، از طبقه‌بندی اقلیمی صورت گرفته توسط Najafi and Alizadeh (2023) استفاده شد که بر اساس آن ایران به ۶ محدوده اصلی اقلیمی مطابق با مرزهای مشخص شده در شکل ۱ با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ تقسیم شده است.

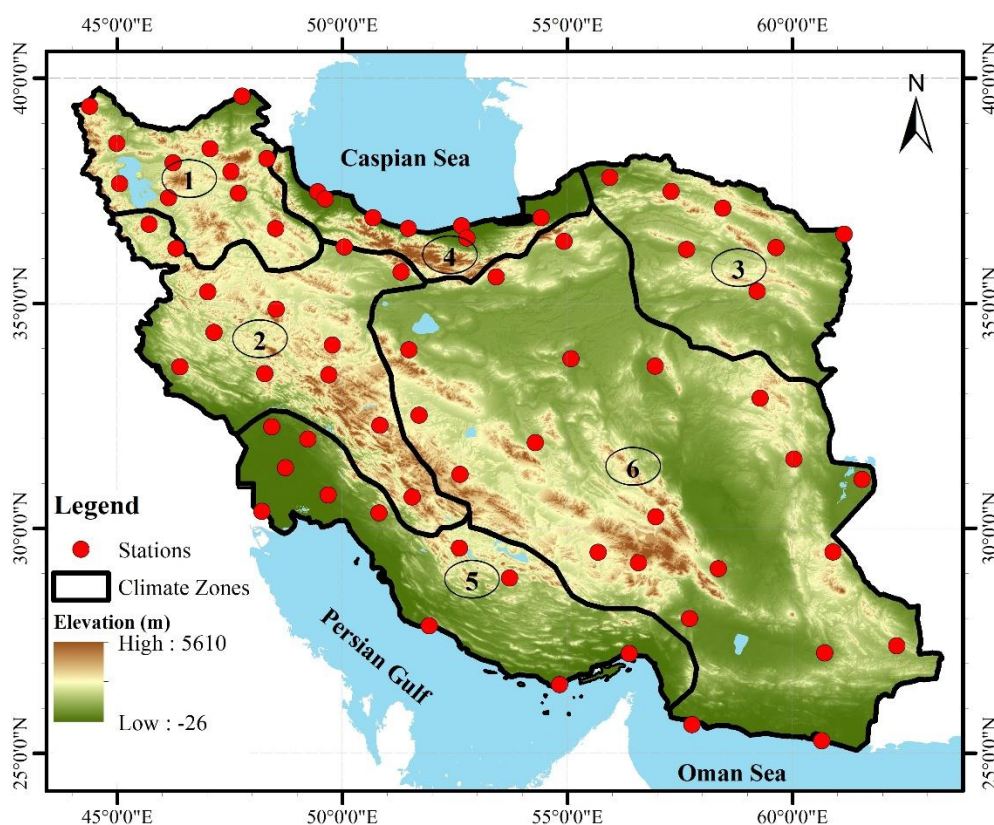


Fig. 1- Location of the meteorological stations and climate zones

شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی و محدوده‌های اقلیمی

Table 1- Description of climate zones used in the study

جدول ۱- مشخصات محدوده‌های اقلیمی مورد استفاده در تحقیق

Climate zone	Climate description	Location in Iran	Number of stations
1	Cold and temperate semi-arid	North-west	11
2	Cool and sub-humid	West	13
3	Warm and semi-arid	North-east	7
4	Mild and humid	North	7
5	Warm and arid	South-west	11
6	Warm and hyper-arid	Center, east and south-east	21

Table 2- Characteristics of satellite and reanalysis precipitation data evaluated in the study

جدول ۲- مشخصات داده‌های بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل مورد ارزیابی در تحقیق

Product	Type	Version	Time range	Temporal resolution	Spatial resolution	Reference
ERA5-Land	Reanalysis	-	1950-present	1 hour	0.1°	Muñoz-Sabater et al. (2021)
GSMaP	Satellite	8	1998-present	1 hour	0.1°	Kubota et al. (2020)
IMERG	Satellite	7	2000-present	30 minutes	0.1°	Huffman et al. (2023)
MSWEP	Satellite	2.8	1979-present	3 hours	0.1°	Beck et al. (2019a)
CHIRPS	Satellite	2	1981-present	1 day	0.05°	Funk et al. (2015)

توسط سازمان فضایی ایالات متحده آمریکا توسعه داده شده و برای محدوده جغرافیایی بین ۶۰ درجه شمالی و ۶۰ درجه جنوبی عرضه می‌شود. ویرایش ۷ این پایگاه در سپتامبر ۲۰۲۳ منتشر شده است که شامل تغییرات زیادی نسبت به نسخه قبل است که شرح آن‌ها در Huffman et al. (2023) آمده است.

MSWEP^{۱۸}: یک محصول بارش جهانی تلفیقی از اطلاعات بارش زمینی، ماهواره‌ای و بازتحلیل است که بر اساس وزن‌دهی متغیر منطقه‌ای با یکدیگر ترکیب می‌شوند. ویرایش ۲/۸ این پایگاه اطلاعاتی در سال ۲۰۲۱ ارائه شده است و مهم‌ترین تغییر آن شامل بکارگیری تنها یک پایگاه اطلاعاتی برای بارش ماهواره‌ای (IMERG) و بازتحلیل (ERA5) است، در حالی که در ویرایش‌های قبلی از ۳ محصول بارش ماهواره‌ای (TRMM و GSMaP، CMORPH) و دو محصول بارش بازتحلیل (ERA-Interim و JRA-55) استفاده شده بود. شرح کامل مشخصات این پایگاه اطلاعاتی و تغییرات آن در مرجع GloH2O (2021) مورد اشاره قرار گرفته است.

CHIRPS^{۱۹}: این پایگاه اطلاعات بارشی با همکاری سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده و دانشگاه کالیفرنیا توسعه داده شده و تخمین بارش در آن بر اساس اطلاعات سنجنده‌های طیف مادون قرمز ثبت شده توسط ماهواره‌های TRMM و واسنجی بر اساس اطلاعات بارش زمینی درون‌یابی شده صورت می‌گیرد (Funk et al., 2015).

اطلاعات روزانه بارش پایگاه‌های مورد نظر به‌صورت شبکه‌ای برای سطح ایران استخراج شد. شایان ذکر است، در برخی از پایگاه‌های اطلاعاتی که اطلاعات روزانه به‌طور مستقیم ارائه نمی‌شود، این اطلاعات از تجمیع اطلاعات ساعتی مربوط به هر روز تولید شد. همچنین، برای تطبیق اطلاعات شبکه‌ای پایگاه‌های بارش مورد بررسی با ایستگاه‌های مورد نظر، ضروری است تا اطلاعات برای نقطه قرارگیری ایستگاه استخراج شد. برای این منظور از روش‌های مختلف درون‌یابی، نظیر نزدیک‌ترین همسایگی (Xie et al., 2022)، دوخطی^{۲۰} (Wang et al., 2022) و وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)^{۲۱} (Wang et al., 2022) استفاده می‌شود. این پایگاه

ویژگی‌های مهم پایگاه‌های اطلاعاتی مذکور در جدول ۲ آمده است و شرح مختصر هر یک در ادامه ارائه می‌شود.

ERA5-Land^{۱۲}: این پایگاه اطلاعاتی دارای بیشترین قدرت تفکیک مکانی در بین محصولات بازتحلیل اقلیمی مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت آب و هوا^{۱۳} (ECMWF) است که با تفکیک مکانی بالاتر پارامترهای زمینی مدل بازتحلیل ERA5 در حدود ۹ کیلومتر مسطح‌تای تنها در محدوده خشکی‌های کره زمین تولید می‌شود. تفاوت‌های مهم دیگر این پایگاه با پایگاه ERA5، شامل عدم اجرای مدل بصورت جفت شده با مدل جوی و همچنین به‌کارگیری اطلاعات میدان هواشناسی جو پایین در فرآیند بازتحلیل است که با هدف کاهش هزینه‌های محاسباتی اجرای مدل صورت گرفته است (Muñoz-Sabater et al., 2021).

GSMaP^{۱۴}: یک محصول بارش جهانی با پوشش بین عرض‌های ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی می‌باشد که توسط سازمان فضایی ژاپن از سال ۲۰۰۲ توسعه داده شده است. اطلاعات بارش این محصول با استفاده ترکیبی از ماهواره‌های مختلف، شامل ماهواره‌های ماموریت جهانی اندازه‌گیری بارش^{۱۵} (GPM) و ماهواره‌های زمین‌آهنگ^{۱۶} که مجهز به حسگرهای مایکروویو غیرفعال و مادون قرمز هستند، تولید می‌شود (JAXA, 2024). نسخه واسنجی شده با اطلاعات زمینی بارش این پایگاه بر اساس اطلاعات بارش روزانه موجود در پایگاه مرکز پیش‌بینی‌های اقلیمی سازمان ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده (NOAA-CPC) در محدوده خشکی‌های کره زمین تولید می‌شود. ویرایش ۸ این محصول در دسامبر ۲۰۲۱ ارائه شده و شامل ارتقاها مهمی نسبت به ویرایش‌های قبلی است که شرح آن‌ها در Kubota et al (2022) ارائه شده است.

IMERG^{۱۷}: مشهورترین الگوریتم تولید بارش در GPM است که اطلاعات ماهواره‌ای خام مورد استفاده در آن همپوشانی زیادی با GSMaP دارد و برای واسنجی با داده‌های زمینی نیز از اطلاعات بارش ماهانه موجود در پایگاه GPCC استفاده می‌شود. این پایگاه

et al., 2021) استفاده شده که در این تحقیق نیز از روش IDW مبتنی بر نزدیکترین ۴ نقطه شبکه به هر ایستگاه استفاده شد.

۳-۲- شاخص‌های ارزیابی

ارزیابی دقت پایگاه‌های اطلاعاتی مورد ارزیابی بر اساس دو گروه شاخص‌های دقت برآورد و قابلیت تشخیص صورت می‌گیرد (Brown et al., 2008). شاخص‌های دقت برآورد منعکس کننده دقت محصولات بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل در تخمین مقدار بارش هستند. بدین منظور از شاخص‌های مجذور مربعات خطای نرمال شده^{۲۲} (NRMSE)، انحراف نسبی^{۲۳} (RB)، انحراف نسبی مطلق^{۲۴} (RAB) و ضریب همبستگی پیرسون^{۲۵} (CC) استفاده شد که مطابق با روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}}{\sigma_x} \times 100 \quad (۱)$$

$$RB = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)}{\sum_{i=1}^N X_i} \times 100 \quad (۲)$$

$$RAB = \frac{\sum_{i=1}^N |Y_i - X_i|}{\sum_{i=1}^N X_i} \times 100 \quad (۳)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}} \quad (۴)$$

که در این روابط N تعداد داده‌ها، X_i و Y_i به ترتیب لامین داده مشاهده‌ای و برآورد شده، \bar{X} و \bar{Y} به ترتیب مقادیر متوسط داده مشاهده‌ای و برآورد شده و σ_x نیز انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای است.

شاخص NRMSE نشان‌دهنده مقدار کلی خطای نرمال شده داده برآورد شده نسبت به داده مشاهده‌ای می‌باشد که دامنه آن بین صفر تا بی‌نهایت متغیر است و مقدار بهینه آن برابر با صفر می‌باشد. شاخص RB بیانگر درصد انحراف داده برآورد شده نسبت به مقدار مشاهده‌ای می‌باشد و دامنه آن بین منفی صد تا مثبت بی‌نهایت متغیر است که مقدار بهینه آن صفر است. علامت شاخص RB نشان‌دهنده نوع انحراف داده برآورد شده در مقایسه با داده مشاهده‌ای است، به نحوی که علامت مثبت (منفی) نشان‌دهنده بیش‌برآورد (کم‌برآورد) نسبت به مقدار مشاهده‌ای است. شاخص RAB مشابه RB است، با این تفاوت که مقدار مطلق انحراف بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی را در نظر گرفته و به همین سبب مقدار آن بین صفر تا مثبت بی‌نهایت قرار می‌گیرد. دلیل به‌کارگیری هر دو شاخص در تحقیق حاضر، تشریح همزمان جهت انحراف متوسط (بیش‌برآورد یا کم‌برآورد) در کنار ارائه مقدار انحراف کلی (بیش‌برآورد و کم‌برآورد) هر پایگاه مورد بررسی است. شاخص CC نیز معیار مناسبی از میزان ارتباط خطی داده برآورد

شده در مقایسه با داده مشاهده‌ای است. دامنه این شاخص از منفی یک تا یک متغیر است که مقدار شاخص نزدیک به یک (منفی یک) نشان‌دهنده ارتباط قوی خطی مستقیم (معکوس) مقادیر مشاهده‌ای با مقادیر ارائه شده در پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی است (Brown et al., 2008).

علاوه بر شاخص‌های فوق، چهار شاخص قابلیت تشخیص نیز در تحقیق حاضر به کار گرفته شد. این دسته از شاخص‌ها که به آن‌ها شاخص‌های ارزیابی دقت طبقه‌بندی نیز اطلاق می‌شود، برای ارزیابی ظرفیت تفکیک وقایع بارش روزانه توسط هر پایگاه داده به کار گرفته می‌شوند. شاخص‌های مورد استفاده برای این منظور عبارتند از احتمال تشخیص^{۲۶} (POD)، نسبت هشدار اشتباه^{۲۷} (FAR) موفقیت بحرانی^{۲۸} (CSI) و فرکانس انحراف^{۲۹} (FB) هستند که با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند (Jolliffe and Stephenson, 2012):

$$POD = \frac{Hits}{Hits + Misses} \quad (۵)$$

$$FAR = \frac{False\ alarms}{False\ alarms + Hits} \quad (۶)$$

$$CSI = \frac{Hits}{Hits + Misses + False\ alarms} \quad (۷)$$

$$FB = \frac{Hits + False\ alarms}{Hits + Misses} \quad (۸)$$

که در این روابط Hits تعداد وقایعی است که در داده مشاهده‌ای وجود داشته و در داده برآورد شده نیز تشخیص داده شده، Misses تعداد وقایعی است که در داده مشاهده‌ای وجود داشته و در داده برآورد شده تشخیص داده نشده و False alarms تعداد وقایعی است که در داده مشاهده‌ای وجود نداشته و در داده برآورد شده به اشتباه تشخیص داده شده‌اند.

شاخص POD نشان‌دهنده نسبت وقایع درست تشخیص داده شده در داده برآوردی به کل وقایع مشاهده شده است که دامنه آن بین صفر و یک است و هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده کیفیت بالاتر داده برآورد شده است. شاخص FAR نشان‌دهنده نسبت وقایع به اشتباه تشخیص داده شده در داده برآوردی نسبت به کل وقایع تشخیص داده شده در داده برآورد شده است و دامنه آن بین صفر تا یک است و مقدار کوچکتر آن بهتر است. شاخص CSI نشان‌دهنده ظرفیت کلی داده برآورد شده در تشخیص وقایع مشاهده شده است که دامنه آن بین صفر و یک و مقدار بهینه آن برابر با یک است. در نهایت شاخص FB بیانگر نسبت بین تعداد کل وقایع تشخیص داده شده در داده برآوردی نسبت به کل وقایع موجود در داده مشاهده‌ای است که مقدار آن بین صفر تا بی‌نهایت متغیر است و مقدار بهینه آن برابر با یک است.

برای دسته‌بندی وقایع روزانه بارش به منظور ارزیابی‌های مبتنی بر قابلیت تشخیص، بایستی طبقه‌بندی برای وقایع بارشی در نظر گرفته شود. در تحقیق حاضر از دامنه‌های در نظر گرفته شده توسط Alijanian et al. (2017) برای طبقه‌بندی بارش روزانه در ایستگاه‌های مورد بررسی در سطح کشور به شرح ارائه شده در جدول ۳ استفاده شد.

Table 3- Domains of rainfall classification for calculation of categorical statistics

جدول ۳- دامنه طبقه‌بندی بارش روزانه جهت محاسبه شاخص‌های دقت طبقه‌بندی

Class description	Amount of rainfall
No/tiny rainfall	Rain < 1 mm
Light rainfall	1 mm ≤ Rain < 5 mm
Moderate rainfall	5 mm ≤ Rain < 20 mm
Heavy rainfall	20 mm ≤ Rain

۳- نتایج و بحث

در تحقیق حاضر ارزیابی اطلاعات پایگاه‌های بارشی مورد نظر با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی در مقیاس‌های زمانی مختلف، شامل روزانه، ماهانه و سالانه انجام شد که به ترتیب مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۳-۱- ارزیابی بارش روزانه

نتایج ارزیابی مقادیر روزانه بارش ارائه شده در پایگاه‌های اطلاعات بارش مورد نظر با اطلاعات ایستگاهی از نظر متوسط شاخص‌های دقت برآورد برای کل ایستگاه‌های مورد بررسی و همچنین به تفکیک برای ایستگاه‌های واقع در هر یک از مناطق اقلیمی شش‌گانه کشور در شکل ۳ نشان داده شده است. به‌طور متوسط در ۷۰ ایستگاه مورد بررسی، GSMaP کمترین مقادیر NRMSE و RAB و بیشترین مقدار CC را داشته، هرچند ERA5-Land و IMERG نیز عملکرد نسبتاً نزدیکی از منظر CC داشته‌اند. GSMaP مقادیر بارش روزانه را در ایستگاه‌های مورد بررسی به‌طور متوسط در حدود ۲۰ درصد کم‌برآورد نموده است، در حالی که IMERG در حدود ۱۷ درصد بیش‌برآورد داشته است. MSWEP اگر چه بهترین میزان RB را داشته، اما دارای بیشترین مقدار NRMSE و RAB بوده است که نشان‌دهنده خطای زیاد آن در ارائه اطلاعات بارش روزانه است. به جز GSMaP که دارای کم‌برآوردی مقادیر بارش است، سایر پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی عمدتاً بارش را بیش از مقدار مشاهداتی برآورد

نموده‌اند که در این بین بیشترین مقدار متعلق به ERA5-Land با حدود ۲۷ درصد بیش‌برآوردی است. در مناطق مختلف اقلیمی کشور نیز GSMaP علی‌رغم اینکه بر اساس مقادیر شاخص RB دارای کم‌برآوردی در تخمین مقادیر بارش است، اما کمترین مقدار RAB را در کلیه مناطق داشته و به جز مناطق ۵ و ۶ (جنوب غرب و منطقه مرکز و شرق و جنوب شرق کشور)، در ۴ منطقه دیگر دارای نتایج بهتری نسبت به سایر پایگاه‌های اطلاعاتی از منظر شاخص‌های NRMSE و CC است. IMERG در مناطق ۵ و ۶ عملکرد بهتری نسبت به GSMaP از نظر شاخص‌های NRMSE و CC داشته؛ اما در این مناطق GSMaP کمترین میزان RAB را داشته که نشان‌دهنده متوسط خطای نسبی مطلق پایین‌تر این پایگاه است. در سایر مناطق نیز GSMaP بهترین برآورد بارش روزانه را ارائه داده است. شایان ذکر است، GSMaP در ۱۰ ایستگاه دارای بیش‌برآورد در تخمین بارش روزانه بوده که این تعداد برای IMERG برابر با ۵۳ ایستگاه بوده است. نکته قابل توجه در این تحلیل، کم‌برآوردی اکثر پایگاه‌های ماهواره‌ای بارش در ناحیه پربارش شمالی کشور (منطقه ۴) است که این کم‌برآوردی خصوصاً در GSMaP و IMERG قابل ملاحظه است.

در جدول ۴ مقادیر متوسط شاخص‌های دقت طبقه‌بندی بارش روزانه به تفکیک کلاس‌های مختلف بارشی برای پایگاه‌های اطلاعات بارش مورد بررسی آمده است و در شکل ۴ نیز توزیع آماری و مقادیر منفرد این شاخص‌ها در هر ایستگاه برای کلاس‌های مختلف بارش روزانه نشان داده شده است. بر این اساس، کلیه پایگاه‌ها در تشخیص روزهای بارش کمتر از یک میلی‌متر عملکرد نسبتاً مناسبی داشته و مقدار POD بیش از ۰/۹ داشته‌اند. اما در تشخیص وقوع سایر کلاس‌های بارش عملکرد این پایگاه‌ها چندان مناسب نیست، به نحوی که بیشترین مقدار POD برای کلاس‌های دوم و سوم بارش (روزهای با بارش‌های کم و متوسط) مربوط به ERA5-Land به ترتیب به مقدار ۰/۴۷ و ۰/۵۳ بوده است. مقدار POD این کلاس‌های بارشی برای GSMaP و IMERG مقداری کمتر و برای MSWEP و CHIRPS بسیار کم است. در کلاس روزهای دارای بارش زیاد نیز پایگاه IMERG با مقدار POD برابر با ۰/۴ بهترین عملکرد را داشته است و عملکرد MSWEP و CHIRPS در تشخیص این کلاس از بارش بسیار ضعیف است. به جز در کلاس روزهای دارای بارش کمتر از یک میلی‌متر که ERA5-Land با اختلاف اندکی نسبت به GSMaP و IMERG بهترین مقدار شاخص FAR را دارا بوده، در سایر کلاس‌های بارشی GSMaP بهترین عملکرد را داشته و به‌طور کلی خطای این پایگاه در تشخیص اشتباه روزهای دارای مقادیر بارش قابل توجه، کمتر از سایر پایگاه‌های مورد بررسی است.

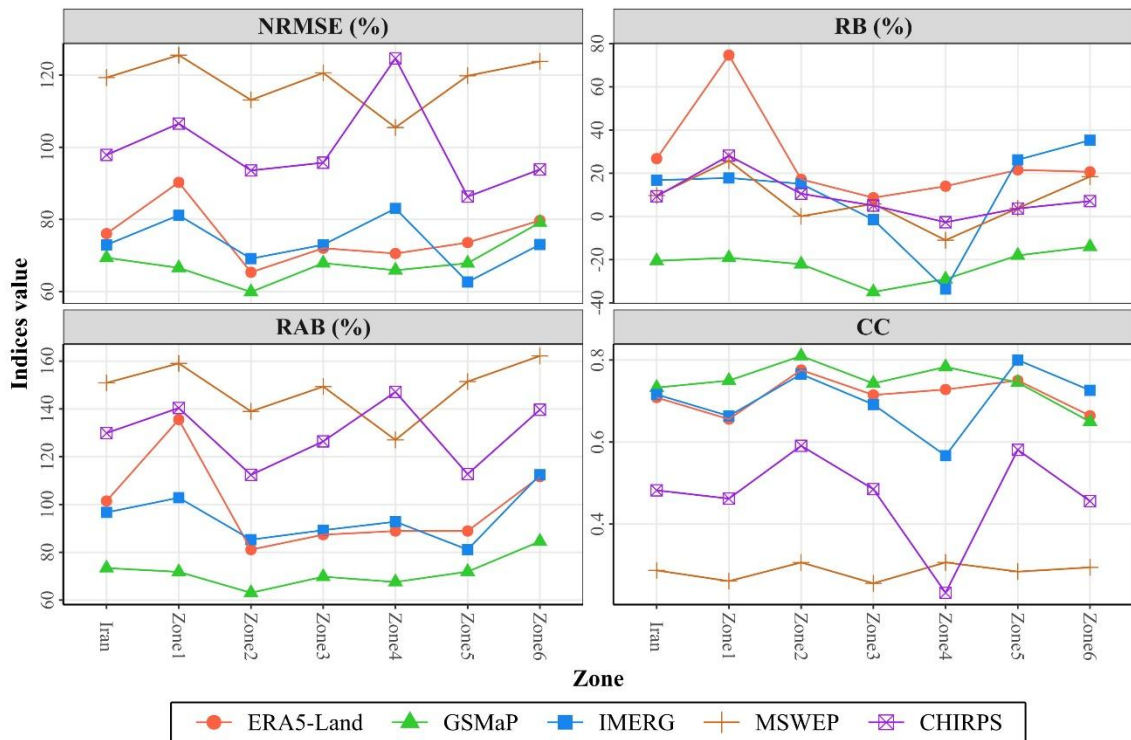


Fig. 2- Mean of accuracy metrics value for daily precipitation estimation of datasets over different climate zones

شکل ۲- مقدار متوسط شاخص‌های دقت برآورد بارش روزانه پایگاه‌های اطلاعاتی به تفکیک مناطق مختلف اقلیمی

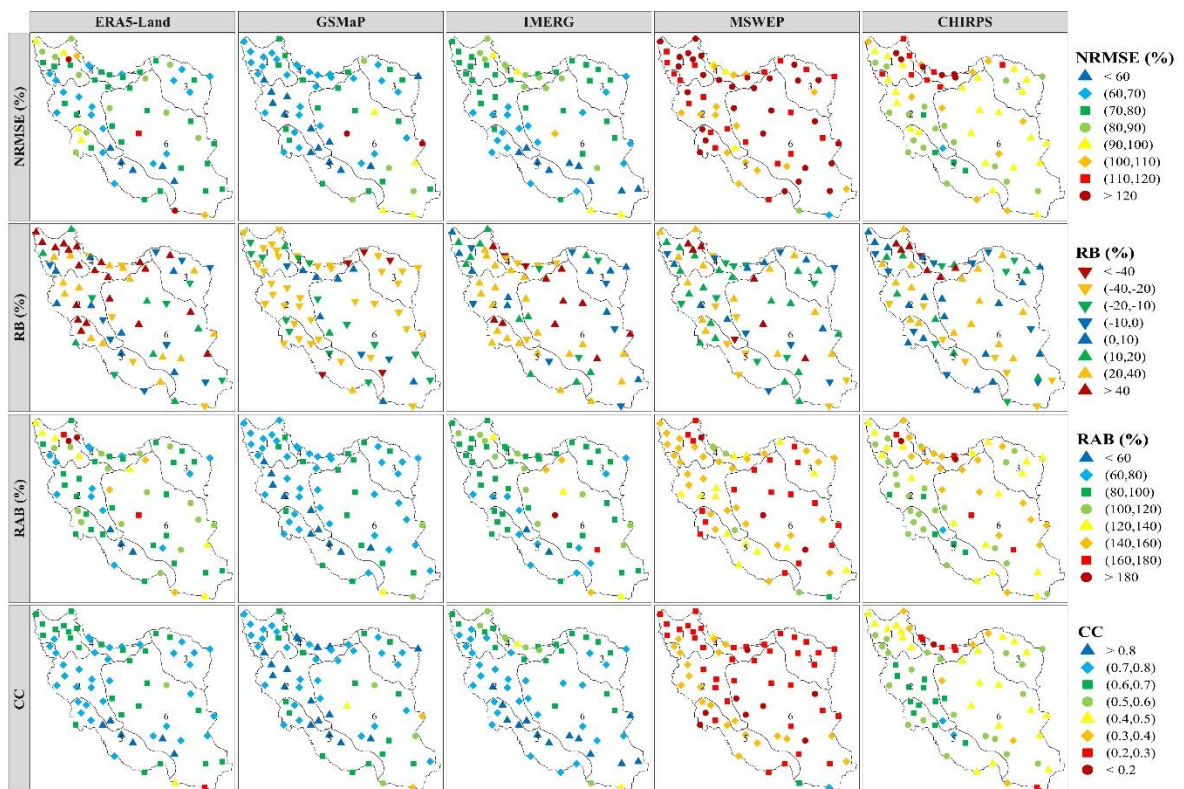


Fig. 3- Accuracy metrics value for daily precipitation at each station for different datasets

شکل ۳- مقدار شاخص‌های دقت برآورد بارش روزانه ایستگاه‌ها برای پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف

کم را نزدیک به دو برابر فراوانی مشاهداتی این کلاس برآورد نموده‌اند. بر اساس این شاخص، به ترتیب در کلاس بارش‌های کم، متوسط و زیاد به ترتیب پایگاه‌های GSMaP، IMERG و MSWEP بهترین عملکرد را داشته‌اند. مقایسه فراوانی وقوع روزهای دارای کلاس‌های مختلف بارشی در ۷۰ ایستگاه با مقادیر مستخرج از پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نیز دیده می‌شود، ERA5-Land فراوانی وقوع روزهای دارای بارش ناچیز را کمتر از مقادیر مشاهداتی و فراوانی وقوع روزهای دارای بارش کم و متوسط را به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیش از مقادیر مشاهداتی نشان داده است. سایر پایگاه‌های مورد بررسی نیز فراوانی وقوع روزهای دارای بارش ناچیز را خصوصاً در منطقه ۴ (ناحیه پربارش شمال کشور) کمتر از مقادیر مشاهده شده برآورد نموده‌اند.

از نظر شاخص FAR، عملکرد MSWEP و CHIRPS در سطح بسیار ضعیفی قرار می‌گیرد و کلاس برآورد بارش ارائه شده توسط این دو پایگاه برای روزهای دارای بارش بیش از یک میلیمتر عمدتاً اشتباه است. بر اساس شاخص CSI، عملکرد GSMaP در کلاس‌های بارشی ناچیز، کم و متوسط بهتر از سایر پایگاه‌ها بوده و در کلاس بارشی زیاد نیز IMERG بهتر بوده است. اما در مجموع می‌توان گفت که هیچ یک از پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی دقت مناسبی در تفکیک کلاس بارش‌های روزانه در روزهای دارای بارش قابل ملاحظه ندارند. شاخص FB نیز برای کلیه پایگاه‌های مورد بررسی در دسته بارش‌های جزئی عملکرد مناسبی را نشان می‌دهد، اما در سایر کلاس‌های بارش مقادیر متفاوتی را برای پایگاه‌های مختلف نشان می‌دهد. به عنوان مثال، ERA5-Land و IMERG فراوانی روزهای دارای بارش‌های

Table 4- Detection metrics of daily rainfall estimation for different datasets by rainfall classes
جدول ۴- شاخص‌های دقت طبقه‌بندی بارش روزانه پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف به تفکیک کلاس‌های مختلف بارش

Statistic	Rainfall class	ERA5-Land	GSMaP	IMERG	MSWEP	CHIRPS
POD	No/tiny rainfall	0.90	0.96	0.92	0.91	0.92
	Light rainfall	0.47	0.46	0.44	0.24	0.21
	Moderate rainfall	0.53	0.46	0.46	0.21	0.33
	Heavy rainfall	0.35	0.29	0.40	0.10	0.19
FAR	No/tiny rainfall	0.02	0.03	0.03	0.06	0.06
	Light rainfall	0.75	0.63	0.77	0.84	0.85
	Moderate rainfall	0.55	0.45	0.55	0.81	0.72
	Heavy rainfall	0.50	0.36	0.48	0.86	0.66
CSI	No/tiny rainfall	0.89	0.93	0.89	0.86	0.87
	Light rainfall	0.19	0.26	0.17	0.11	0.09
	Moderate rainfall	0.32	0.34	0.29	0.11	0.17
	Heavy rainfall	0.25	0.25	0.29	0.06	0.12
FB	No/tiny rainfall	0.92	0.99	0.95	0.97	0.98
	Light rainfall	1.99	1.29	1.98	1.47	1.40
	Moderate rainfall	1.24	0.87	1.06	1.09	1.22
	Heavy rainfall	0.75	0.54	0.80	0.96	0.65

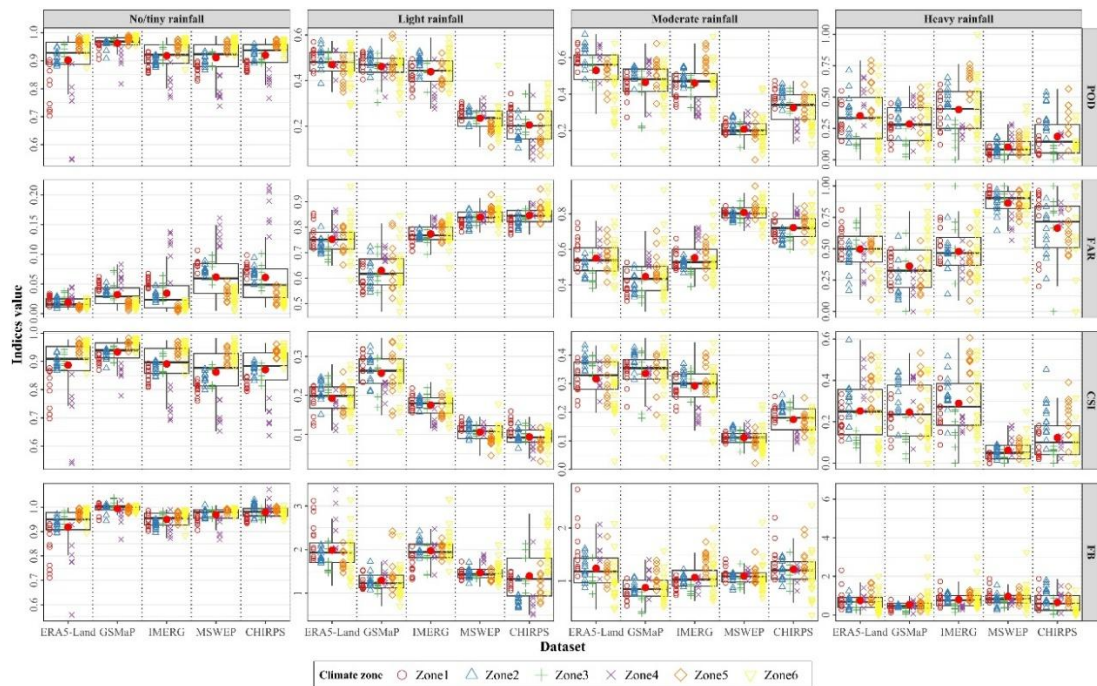


Fig. 4- Box plot diagram of the detection metrics of databases for different daily precipitation classes (small points show individual stations colored by climate zones and big red points shows average of all stations)
 شکل ۴- نمودار جعبه‌ای شاخص‌های دقت طبقه‌بندی بارش توسط پایگاه‌های اطلاعاتی به تفکیک کلاس‌های مختلف بارش روزانه (نقاط ریز مقادیر مربوط به هر ایستگاه را با رنگ‌بندی به تفکیک مناطق اقلیمی نشان می‌دهد و نقطه قرمز بزرگ نشان‌دهنده میانگین کل ایستگاه‌ها است)

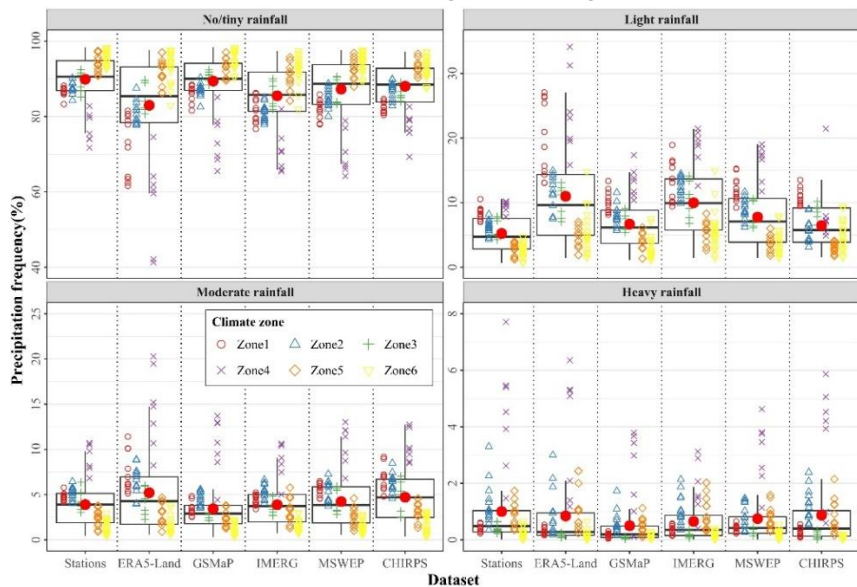


Fig. 5- Box plot diagram of the frequency of precipitation classes based on observational data and different databases (small points show individual stations colored by climate zones and big red point shows average of all stations)
 شکل ۵- نمودار جعبه‌ای فراوانی وقوع روزهای با کلاس‌های مختلف بارشی بر اساس اطلاعات مشاهداتی و پایگاه‌های اطلاعاتی (نقاط ریز مقادیر مربوط به هر ایستگاه را با رنگ‌بندی به تفکیک مناطق اقلیمی نشان می‌دهد و نقطه قرمز بزرگ نشان‌دهنده میانگین کل ایستگاه‌ها است)

عملکرد سایر پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی با بهبود دقت همراه بوده است. شایان ذکر است، بهبود دقت MSWEP و GSMaP بر اساس شاخص RB و GSMaP بر اساس شاخص CC در طول دوره زمانی مورد بررسی در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار است. شایان ذکر است، GSMaP در سال ۲۰۱۰ خطای قابل ملاحظه‌ای در برآورد بارش‌های روزانه داشته که در صورت در نظر نگرفتن این سال، بهبود کلیه شاخص‌های ارزیابی دقت در طول دوره زمانی مورد بررسی در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار است.

موضوع دیگر در خصوص پایگاه‌های اطلاعاتی بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل که می‌تواند در کاربردهای عملیاتی حائز اهمیت باشد، پایداری عملکرد و دقت آن‌ها در طول دوره آماری است. به همین دلیل بررسی میزان تغییرات سالانه شاخص‌های ارزیابی دقت هر یک از پایگاه‌های بارشی مورد بررسی در ارائه اطلاعات بارش روزانه نیز انجام شد که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است و شیب خطی تغییرات هر شاخص در طول دوره زمانی مورد بررسی نیز در جدول ۵ آمده است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که به جز ERA5-Land که مقدار جزئی افزایش در NRMSE در طول زمان نشان داده،

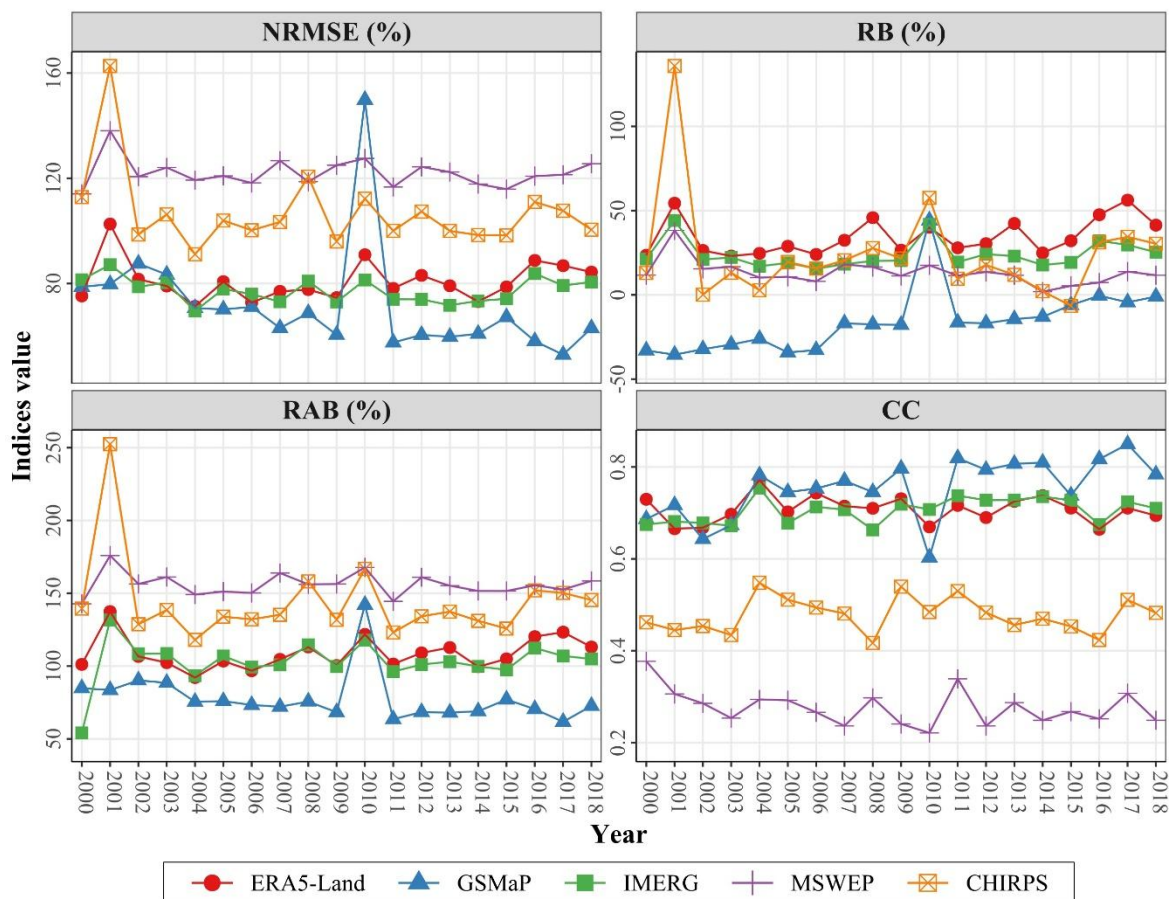


Fig. 6- Annual time series of daily precipitation accuracy metrics for different datasets
 شکل ۶- سری زمانی سالانه متوسط شاخص‌های ارزیابی دقت بارش روزانه برای پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی

Table 5- Linear slope of annual time series of daily precipitation accuracy metrics for different datasets (bolds are statistically significant at the 5% level)

جدول ۵- شیب خطی تغییرات سالانه شاخص‌های ارزیابی دقت بارش روزانه برای پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی

Statistic	ERA5-Land	GSMaP	IMERG	MSWEP	CHIRPS
NRMSE	0.0917	-1.2477	-0.1433	-0.1274	-0.8529
RB	0.7679	2.0255	0.0865	-0.6227	-1.0085
RAB	0.3832	-0.9121	0.4113	-0.1323	-1.0682
CC	-0.0003	0.0070	0.0021	-0.0026	0.0002

۳-۲- ارزیابی بارش ماهانه

مقادیر بارش ماهانه در مشاهداتی و مستخرج از پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی برای ایستگاه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده و خلاصه وضعیت شاخص‌های ارزیابی دقت برآورد بارش هر ماه توسط هر پایگاه اطلاعاتی بصورت متوسط در ۷۰ ایستگاه مورد بررسی و متوسط ایستگاه‌های واقع شده در ۶ منطقه اقلیمی مورد نظر در شکل ۸ آمده است. ERA5-Land در قریب به اتفاق ماه‌ها برای کلیه مناطق اقلیمی دارای بیش‌برآوردی بارش بوده است که مقدار آن خصوصاً برای منطقه اقلیمی ۱ (شمال غرب کشور) قابل توجه است. در مقابل، GSMaP در بسیاری از ماه‌ها و نواحی اقلیمی بارش را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد نموده است و این موضوع برای مناطق اقلیمی ۳ و ۴ (شمال غرب و شمال کشور) بیشتر دیده می‌شود. GSMaP در منطقه اقلیمی ۱ (شمال غرب کشور) بهترین عملکرد را از نظر شاخص‌های NRMSE، RB و RAB داشته و خطای کمتری در برآورد بارش نسبت به سایر پایگاه‌های مورد بررسی در این منطقه نشان می‌دهد. IMERG در برآورد بارش ماهانه منطقه اقلیمی ۳ (شمال شرق کشور) عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها داشته و کمترین مقادیر NRMSE و RB را نشان می‌دهد. IMERG همچنین به جز منطقه اقلیمی ۴ (شمال کشور) که در اکثر ماه‌های سال دارای کم‌برآوردی بارش است، در نواحی اقلیمی ۱، ۲، ۵ و ۶ عمدتاً دارای بیش‌برآورد بارش ماهانه است که این موضوع در ناحیه ۵ و ۶ (جنوب غرب و مرکز و جنوب و شرق کشور) جدی‌تر دیده می‌شود. IMERG از نظر شاخص CC نیز بهترین عملکرد را مناطق ۵ و ۶ (مشترک با MSWEP) نسبت به سایر پایگاه‌ها به همراه داشته است که نشان دهنده تخمین مناسب‌تر روند تغییرات الگوی بارش ماهانه توسط این پایگاه در منطقه مذکور است. MSWEP بر خلاف شرایط ضعیفی که در برآورد روزانه بارش داشت، در برآوردهای ماهانه بارش در اکثر نواحی کشور بهتر از سایر پایگاه‌های مورد بررسی بوده و کمترین میزان شاخص NRMSE را در مناطق ۲، ۴ و ۶ (غرب، شمال و مرکز و جنوب و شرق کشور)، کمترین مقادیر شاخص RAB را در نواحی ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ (کلیه مناطق به جز منطقه شمال غرب کشور) و بیشترین مقدار CC را در نواحی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۶ (کلیه مناطق به جز جنوب غرب کشور) داشته است. به‌طور متوسط نیز در سطح ۷۰ ایستگاه مورد بررسی، MSWEP از نظر کلیه شاخص‌های ارزیابی دقت برآورد در جایگاه نخست قرار می‌گیرد. CHIRPS عملکرد مناسبی در برآورد مقادیر بارش ماهانه در اکثر نواحی اقلیمی نشان نمی‌دهد، به نحوی که از نظر شاخص‌های NRMSE و RAB ضعیف‌ترین عملکرد را در نواحی ۲، ۳، ۴ و ۶ (کلیه نواحی به جز شمال غرب و جنوب غرب کشور) و از نظر شاخص

CC ضعیف‌ترین عملکرد را در کلیه نواحی به جز منطقه ۵ (جنوب غرب کشور) نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در اطلاعات بارش ماهانه مستخرج از CHIRPS برای ایستگاه‌های مورد بررسی، مناسب بودن مقادیر متوسط شاخص RB آن‌ها است که می‌تواند باعث نتیجه‌گیری اشتباه در خصوص دقت این پایگاه اطلاعاتی شود. چراکه مقادیر مثبت و منفی این شاخص هم در هنگام محاسبه اولیه و هم در هنگام میانگین‌گیری مقدار شاخص در ایستگاه‌های مختلف می‌تواند یکدیگر را خنثی کرده و عدد به ظاهر مناسبی را به دست دهد. نمونه بارز این موضوع مقدار شاخص RB این پایگاه اطلاعاتی برای ایستگاه‌های واقع در منطقه ۴ (شمال کشور) می‌باشد که عددی نزدیک به صفر (مقدار بهینه شاخص RB) را ارائه نموده، اما بررسی مقدار شاخص RAB نشان می‌دهد که این پایگاه اطلاعاتی در منطقه مورد اشاره دارای بیشترین مقادیر انحراف نسبی از مقادیر مشاهداتی نسبت به سایر پایگاه‌های مورد بررسی است.

شکل ۹ مقادیر شاخص‌های ارزیابی دقت تخمین بارش ماهانه برای هر یک از پایگاه‌های اطلاعاتی بارش را در ۷۰ ایستگاه مورد بررسی در سطح کشور نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نیز دیده می‌شود، MSWEP شرایط بهتری نسبت به سایر پایگاه‌های اطلاعاتی از نظر شاخص‌ها نشان می‌دهد. هر چند در برخی از ایستگاه‌ها عملکرد سایر پایگاه‌های اطلاعاتی، خصوصاً IMERG در منطقه ۵ (جنوب غربی کشور) و GSMaP در منطقه ۱ (شمال غربی کشور) بهتر بوده است.

۳-۳- ارزیابی بارش سالانه

شکل ۱۰ مقادیر بارش سالانه مشاهداتی و برآورد شده توسط پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی را در ایستگاه‌ها نشان می‌دهد و در شکل ۱۱ نیز مقادیر متوسط شاخص‌های دقت برآورد بارش سالانه در ۷۰ ایستگاه مورد بررسی آمده است. بر این اساس می‌توان گفت MSWEP بهترین عملکرد را تخمین بارش سالانه در مجموع ایستگاه‌های مورد بررسی داشته است و مقدار CC آن برای کلیه ایستگاه‌ها بیشتر از 0.5 می‌باشد. IMERG در مجموع عملکردی نزدیک به MSWEP داشته و در نواحی اقلیمی ۱ و ۳ (شمال غرب و شمال شرق کشور) مقادیر مناسب‌تر NRMSE، RB و RAB و در منطقه ۵ (جنوب غربی کشور) مقدار بهتری از شاخص CC را نسبت به MSWEP ارائه می‌دهد. ERA5-Land در کلیه نواحی اقلیمی بارش را بیشتر از مقادیر مشاهده شده برآورد نموده است که این بیش‌برآورد در منطقه ۱ (شمال غرب کشور) بسیار زیاد است.

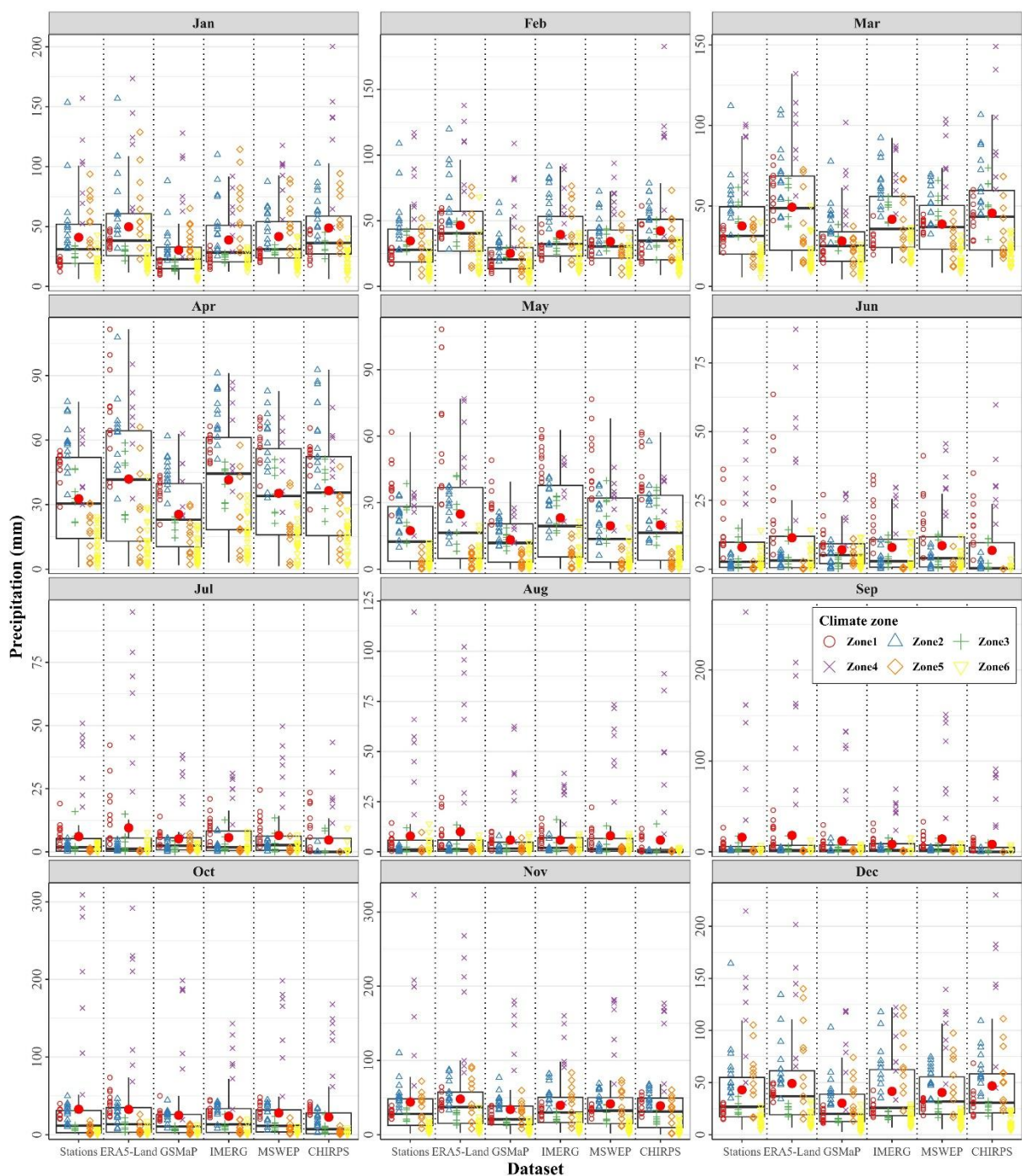


Fig. 7- Box plot of monthly precipitation in stations based on observed and database data (small points show individual stations colored by climate zones and big red point shows average of all stations)

شکل ۷- نمودار جعبه‌ای مقدار بارش ماهانه ایستگاه‌ها بر اساس اطلاعات مشاهداتی و مقادیر پایگاه‌های اطلاعاتی (نقاط ریز مقادیر مربوط به هر ایستگاه را با رنگ‌بندی به تفکیک مناطق اقلیمی نشان می‌دهد و نقطه قرمز بزرگ نشان‌دهنده میانگین کل ایستگاه‌ها است)

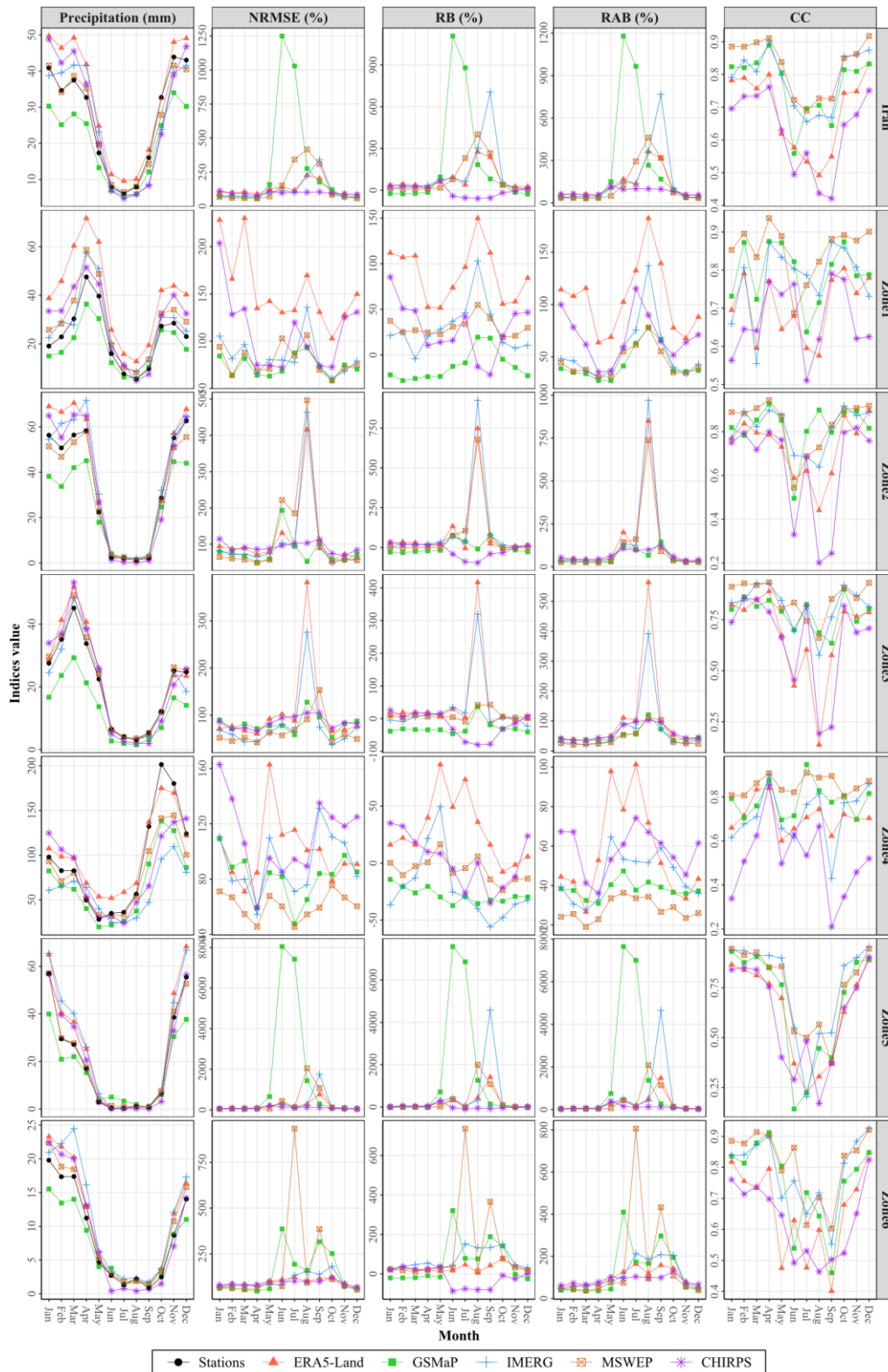


Fig. 8- Average of observed and estimated monthly precipitation and accuracy metrics for by datasets in every month over different climate zones

شکل ۸- مقدار متوسط بارش ماهانه مشاهداتی و برآورد شده و شاخص‌های دقت برآورد پایگاه‌های اطلاعاتی در هر ماه به تفکیک مناطق مختلف اقلیمی

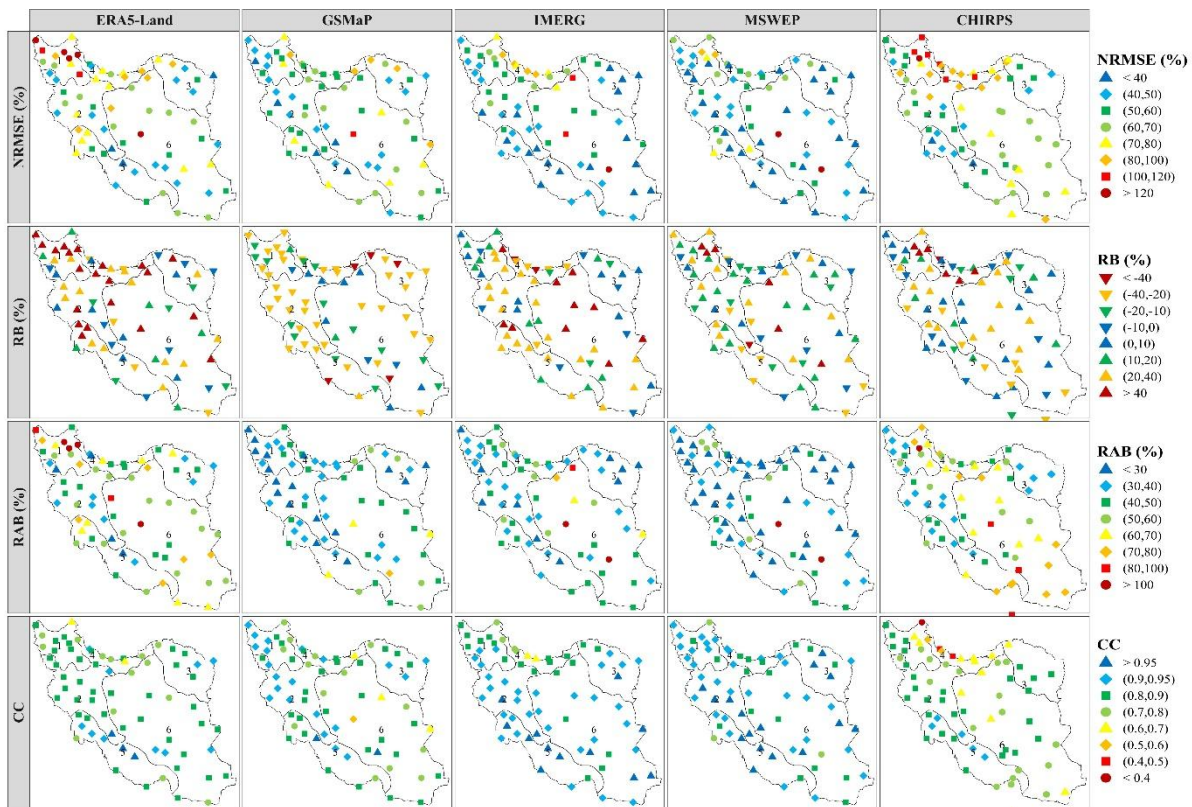


Fig. 9- Average of accuracy metrics values for monthly precipitation at each station for different precipitation datasets

شکل ۹- مقدار متوسط شاخص‌های دقت برآورد بارش ماهانه در هر ایستگاه برای پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی

کم‌برآورد است که خصوصاً در منطقه اقلیمی ۳ (شمال شرق کشور) قابل ملاحظه است. این پایگاه همچنین از نظر متوسط مقادیر CC هم در کل ایستگاه‌ها و هم به تفکیک مناطق اقلیمی مختلف در رتبه پایین‌تری نسبت به اکثر سایر پایگاه‌ها قرار می‌گیرد و تنها نسبت به CHIRPS در برخی از نواحی شرایط بهتری دارد. برای نمایش بهتر وضعیت برآورد بارش سالانه، وضعیت شاخص‌های دقت برآورد بارش سالانه توسط پایگاه‌های مختلف برای هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

بررسی تغییرات دقت برآورد بارش سالانه پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی در طول دوره زمانی ارزیابی نیز انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این تحلیل نشان می‌دهد که GSMaP، روند افزایشی یا کاهش‌ی مشخصی در مقدار شاخص‌های دقت برآورد بارش سالانه در سایر پایگاه‌های مورد بررسی در طول دوره آماری دیده نمی‌شود. مقادیر شیب خطی تغییرات شاخص‌های دقت برآورد برای پایگاه‌های مختلف در جدول ۶ آمده است که بر اساس آن GSMaP در تمامی شاخص‌های روند بهبود و ارتقای دقت معنی‌دار

همچنین این پایگاه بهترین برآوردها را در خصوص مقادیر بارش سالانه در ایستگاه‌های ناحیه ۴ (شمال کشور) داشته و تنها پایگاه اطلاعاتی بوده که توانسته مقادیر متوسط بارش سالانه را برای پربارش‌ترین منطقه کشور با دقت مناسبی برآورد نماید. علی‌رغم این موضوع، ERA5-Land در زمینه شناسایی الگوی تغییرات سالانه بارش در کلیه نواحی کشور عملکرد ضعیف‌تری نسبت به MSWEP و IMERG نشان می‌دهد که شاخص CC کمتر مؤید این موضوع است. CHIRPS از نظر متوسط شاخص RB بهترین عملکرد را برای ۷۰ ایستگاه مورد بررسی نشان می‌دهد و از نظر شاخص‌های NRMSE و RAB نیز وضعیت نسبتاً مناسب و نزدیک به MSWEP و IMERG دارد، اما مقدار CC آن بسیار پایین‌تر است که این موضوع نشان‌دهنده عدم توانایی مناسب این پایگاه در تخمین روند تغییرات بین‌سالی بارش است. این مسأله در منطقه ۴ (شمال کشور) بسیار جدی است که علی‌رغم RB بسیار مناسب و NRMSE و RAB مشابه با IMERG، نشان‌دهنده خطای قابل ملاحظه CHIRPS در برآوردهای سالانه بارش در این منطقه است. GSMaP در برآوردهای سالانه بارش نیز همانند بارش‌های روزانه و ماهانه، عمدتاً دارای

است، اما با توجه به اینکه این تغییرات به سمت دور شدن از مقدار بهینه شاخص مذکور (صفر) می‌باشد، لذا می‌توان گفت شرایط این پایگاه اطلاعاتی از نظر این شاخص در طول دوره آماری حتی مقداری افت نشان می‌دهد.

در سطح آماری ۵ درصد داشته است و سایر پایگاه‌های مورد بررسی چنین وضعیتی نداشته‌اند و بعضاً مقداری روند منفی غیرمعنی‌دار نیز در این شاخص‌ها نشان می‌دهند. شایان ذکر است، روند تغییرات شاخص RB برای پایگاه ERA5-Land در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار

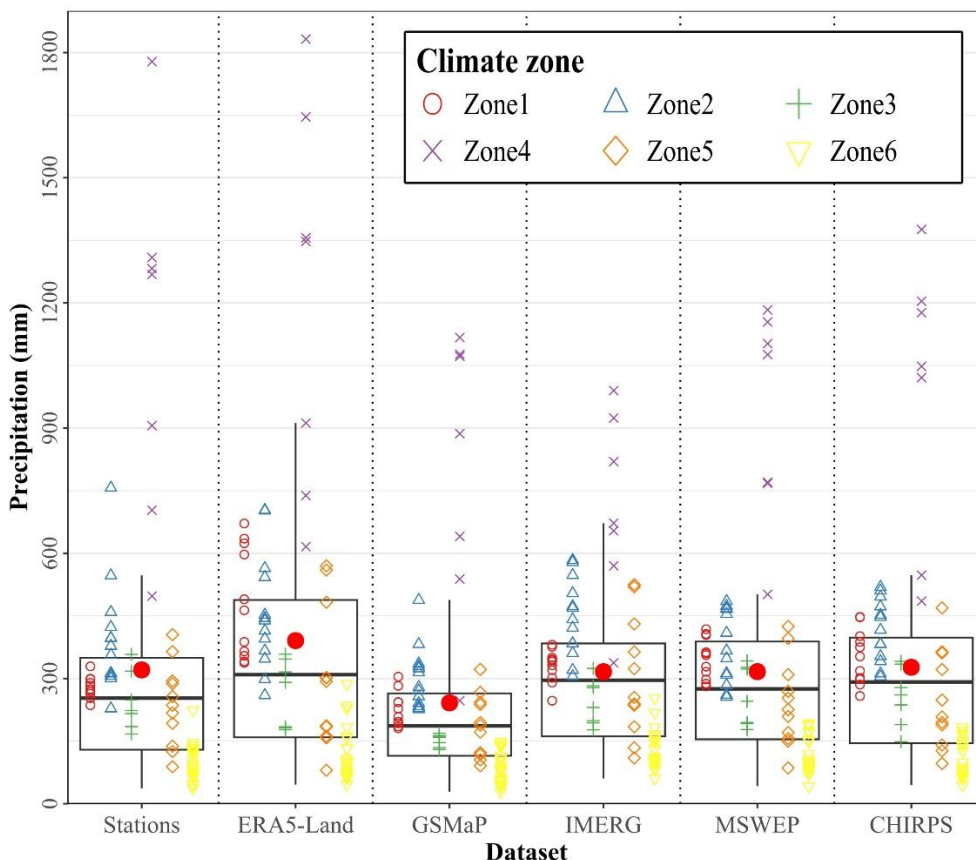


Fig. 10- Box plot of yearly precipitation for stations and databases (small points show individual stations colored by climate zones and big red point shows average of all stations)

شکل ۱۰- نمودار جعبه‌ای مقدار بارش سالانه در ایستگاه‌ها و پایگاه‌های اطلاعاتی (نقاط ریز مقادیر مربوط به هر ایستگاه را با رنگ‌بندی به تفکیک مناطق اقلیمی نشان می‌دهد و نقاط قرمز بزرگ نشان‌دهنده میانگین کل ایستگاه‌ها برای هر پایگاه است)

Table 6- Linear slope of annual time series of daily precipitation accuracy metrics for different datasets (bolds are statistically significant at the 5% level)

جدول ۶- شیب خطی تغییرات سالانه شاخص‌های ارزیابی دقت بارش روزانه برای پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی (اعداد برجسته در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار هستند)

Statistic	ERA5-Land	GSMaP	IMERG	MSWEP	CHIRPS
NRMSE	-0.158	-2.388	0.134	0.127	0.338
RB	0.555	2.123	0.397	-0.114	0.106
RAB	0.235	-1.788	0.196	-0.063	0.174
CC	0.002	0.004	-0.002	0.000	-0.002

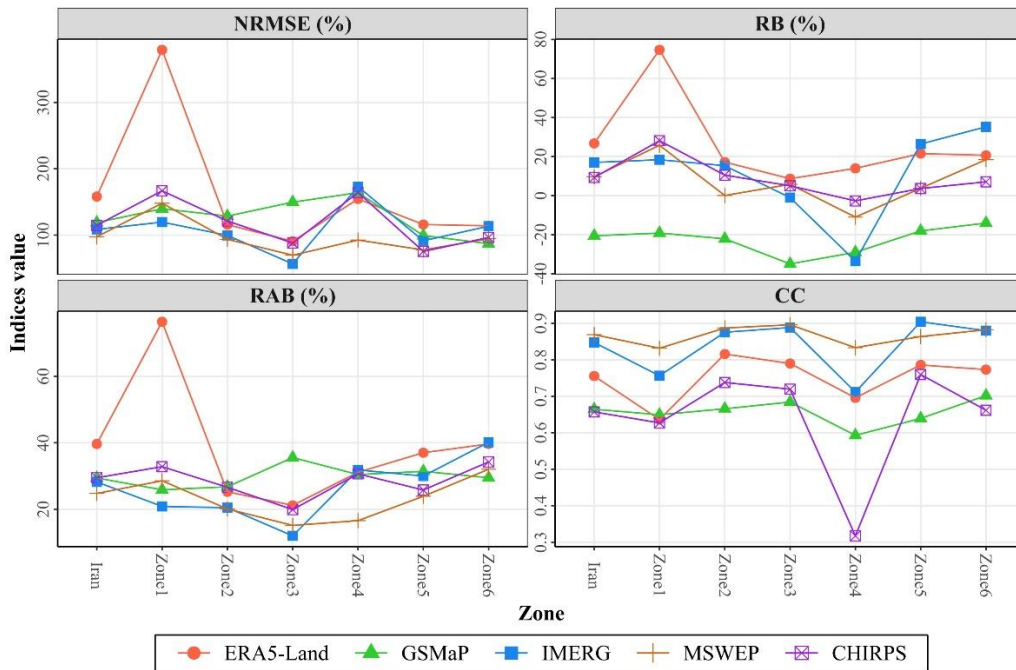


Fig. 11- Mean of accuracy metrics value for yearly precipitation estimation of datasets over different climate zones

شکل ۱۱- مقدار متوسط شاخص‌های دقت برآورد بارش سالانه پایگاه‌های اطلاعاتی به تفکیک مناطق مختلف اقلیمی

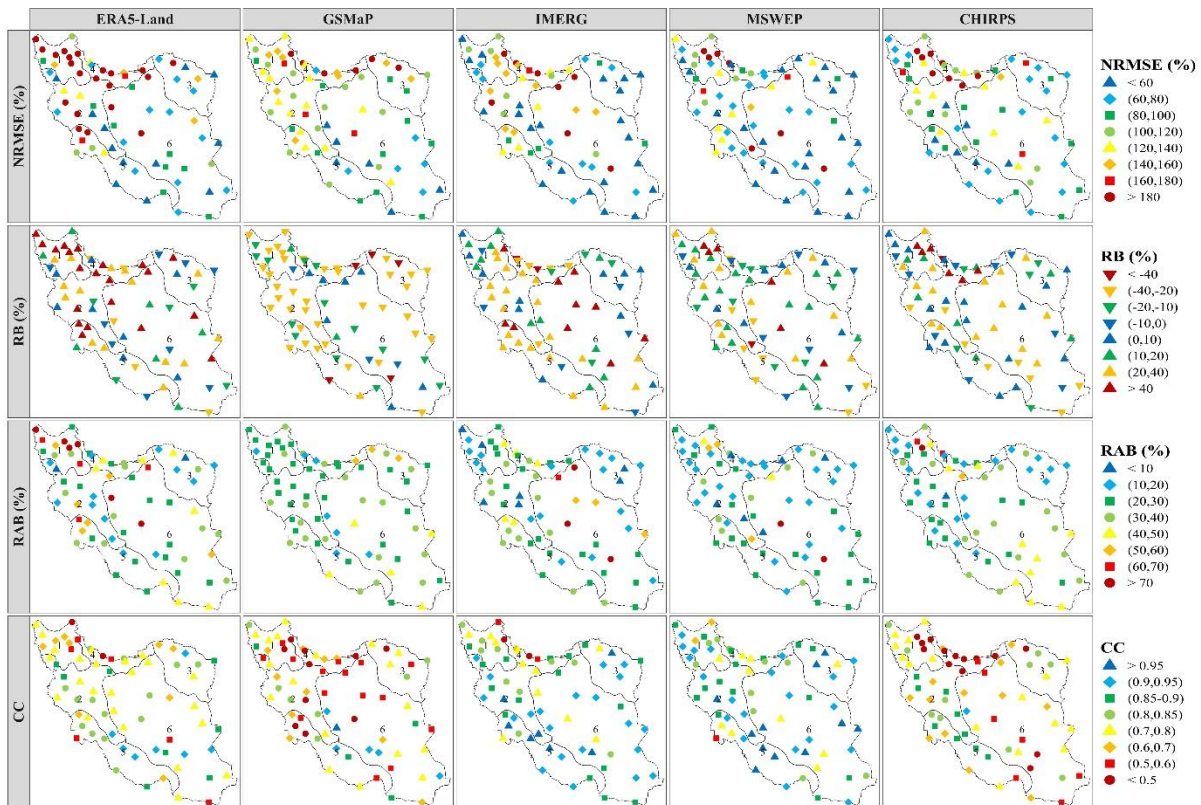


Fig. 12- Average of accuracy metrics values for monthly precipitation at each station for different precipitation datasets

شکل ۱۲- مقدار متوسط شاخص‌های دقت برآورد بارش سالانه در هر ایستگاه برای پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی

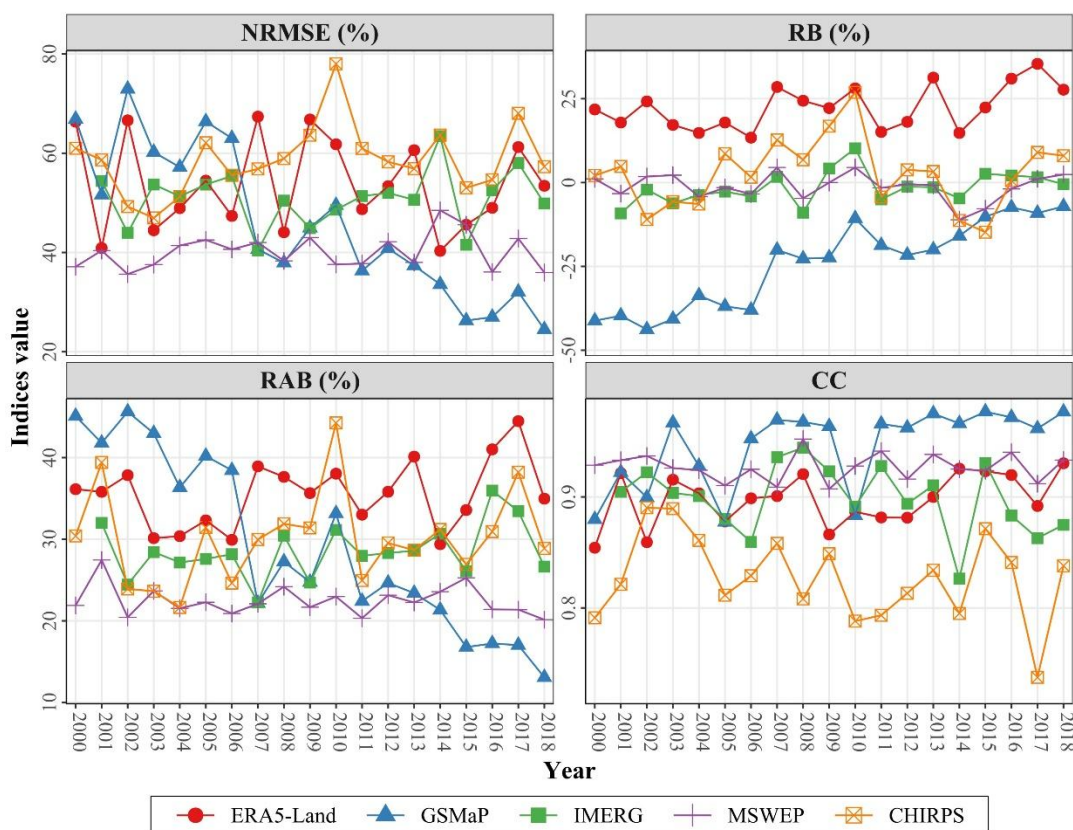


Fig. 13- Annual time series of yearly precipitation accuracy metrics for different datasets

شکل ۱۳- سری زمانی سالانه متوسط شاخص‌های ارزیابی دقت بارش سالانه برای پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی

نزدیک به آن است. سایر پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی در تخمین بارش‌های روزانه عمدتاً دارای بیش‌برآوردی هستند که در این بین مقادیر بیش‌برآورد اطلاعات بارش ERA5-Land در منطقه شمال غربی کشور بسیار قابل توجه است. عملکرد CHIRPS و MSWEP در زمینه تخمین بارش‌های روزانه نیز به ترتیب ضعیف و بسیار ضعیف است؛

● اگرچه اکثر پایگاه‌های اطلاعاتی مورد بررسی در تشخیص روزهای بدون بارش یا دارای بارش جزئی عملکرد قابل قبولی دارند، اما عملکرد آن‌ها در طبقه‌بندی روزهای همراه با بارش قابل ملاحظه چندان مناسب نیست. در مجموع GSMaP از این نظر نیز اطلاعات بهتری را به دست می‌دهد، هرچند IMERG در طبقه‌بندی روزهای با بارش بسیار زیاد عملکرد بهتری داشته است. ERA5-Land فراوانی وقوع روزهای دارای بارش ناچیز را کمتر از مقادیر مشاهداتی و فراوانی وقوع روزهای دارای بارش کم و متوسط را خصوصاً در نواحی شمال و شمال غرب کشور بیش از میزان واقعی نشان داده است؛

● بر خلاف بارش روزانه، MSWEP در تخمین بارش‌های ماهانه و سالانه بهترین عملکرد را در بین پایگاه‌های مورد بررسی داشته است و پس از آن نیز IMERG قرار می‌گیرد. ERA5-Land عمدتاً دارای

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه به ارزیابی جدیدترین ویرایش‌های در دسترس پایگاه‌های اطلاعات بارشی جهانی بازتحلیل و ماهواره‌ای دارای بیشترین قدرت تفکیک مکانی در سطح ایران پرداخته شد. بدین منظور از اطلاعات بارش در ۷۰ ایستگاه هواشناسی پراکنده در سطح کشور استفاده شد و تحلیل دقت برآورد بارش پایگاه‌های مختلف در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و سالانه انجام شد. ارزیابی بارش روزانه با استفاده از دو گروه شاخص‌های دقت برآورد و شاخص‌های دقت طبقه‌بندی و بررسی مقیاس‌های ماهانه و سالانه با استفاده از شاخص‌های دقت برآورد صورت گرفت. همچنین، با توجه به امکان ارتباط بین شرایط اقلیمی نواحی مختلف بر دقت برآوردهای ارائه شده از بارش توسط پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف، تحلیل دقت مقادیر ارائه شده توسط هر پایگاه برای ۶ منطقه اقلیمی مختلف نیز انجام شد. به‌طور خلاصه نتیجه‌گیری‌های زیر از تحلیل‌های صورت گرفته قابل ارائه است:

● GSMaP علی‌رغم کم‌برآورد نمودن مقدار بارش روزانه، بهترین عملکرد را در برآورد مقادیر این مؤلفه در سطح ایستگاه‌های مورد بررسی داشته است، هر چند عملکرد IMERG نیز نسبتاً مناسب و

در نهایت با توجه به اینکه در توسعه و واسنجی اطلاعات بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل در مقیاس جهانی به دلیل عدم دسترسی مراکز توسعه دهنده به اطلاعات گسترده بارش ایستگاهی در سطح ایران و یا مقیاس کلی مورد نظر در توسعه محصول، در بسیاری از موارد می‌توان دقت محصولات نهایی بارش را برای مناطق مورد نظر با به‌کارگیری اطلاعات بارش مشاهداتی تا حد زیادی بهبود بخشید. این موضوع پایه و اساس توسعه پایگاه‌های اطلاعاتی نظیر MSWEP است که در آن پایگاه‌های اطلاعاتی متنوعی شامل اطلاعات ایستگاهی، ماهواره‌ای و بازتحلیل با اعمال ضرابی وزن‌دهی شده و تلفیق می‌شوند (Beck et al., 2019b). مشابه این تحلیل‌ها در سطح ایران موضوع تحقیقات معدودی نظیر مطالعه Yazdandoost et al. (2020) بوده است که می‌تواند موضوع تحقیقات کاربردی آینده برای تولید پایگاه‌های بارشی مناسب در سطح کشور قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Tropical Rainfall Measurement Mission Multi-Satellite Precipitation Analysis
- 2- Global Satellite Mapping of Precipitation
- 3- Climate Prediction Center Morphing Technique
- 4- Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks
- 5- Reanalysis
- 6- PERSIANN-Climate Data Record
- 7- Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
- 8- PERSIANN Dynamic Infrared-Rain
- 9- ECMWF Reanalysis Version-5
- 10- PERSIANN-Cloud Classification System
- 11- Coordinated Universal Time
- 12- <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>
- 13- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- 14- <https://gportal.jaxa.jp/>
- 15- Global Precipitation Measurement Mission
- 16- Geostationary Satellite
- 17- <https://disc.gsfc.nasa.gov/>
- 18- <https://www.gloh2o.org/mswep/>
- 19- <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>
- 20- Bilinear Interpolation
- 21- Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation
- 22- Normalized Root Mean Square Error
- 23- Relative Bias
- 24- Relative Absolute Bias
- 25- Pearson Correlation Coefficient
- 26- Probability of Detection
- 27- False Alarm Ratio
- 28- Critical Success Index
- 29- Frequency Bias

بیش‌برآورد بارش ماهانه و سالانه در اکثر مناطق کشور است که مقدار آن برای ناحیه شمال غربی قابل ملاحظه است که در این ناحیه GSMaP بهترین عملکرد را دارد. برای ناحیه پربارش شمال کشور، ERA5-Land از نظر برآورد مقادیر متوسط بارش ماهانه و سالانه عملکرد بهتری نسبت به سایر پایگاه‌ها نشان می‌دهد، اما مقدار پایین ضریب همبستگی آن نشان‌دهنده ضعف در تخمین تغییرات بین‌سالی مقادیر بارش توسط این پایگاه اطلاعاتی است؛

● بررسی دقت برآورد بارش به تفکیک ماه‌های مختلف نشان دهنده کاهش دقت برآوردها توسط کلیه پایگاه‌های مورد بررسی برای ماه‌های کم‌بارش و دوره‌های خشک سالانه است. همچنین، دقت برآورد بارش در پایگاه‌های مورد بررسی برای نواحی کم‌بارش واقع شده در شمال شرق، مرکز و جنوب کشور خصوصاً در ماه‌های خشک سال پایین‌تر از سایر مناطق است؛

● ارزیابی بهبود دقت اطلاعات ارائه شده توسط هر پایگاه اطلاعاتی در مقیاس زمانی روزانه و سالانه نشان‌دهنده معنی‌دار بودن بهبود دقت GSMaP از نظر اکثر شاخص‌های ارزیابی خطاها است. ERA5-Land از نظر برآوردهای روزانه بارش مقداری کاهش دقت معنی‌دار در طول زمان نشان می‌دهد و تغییرات دقت سایر پایگاه‌های اطلاعاتی معنی‌دار نیست.

تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهد اطلاعات برخی از پایگاه‌های بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل خصوصاً در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه از دقت مناسبی برخوردارند. هرچند با توجه به تغییرات مداوم در منابع اطلاعاتی، توسعه روزافزون روش‌های تحلیل و پردازش اطلاعات ماهواره‌ای و کمیت و کیفیت به‌کارگیری اطلاعات ایستگاه‌های زمینی در تولید محصولات بارش ماهواره‌ای، ارزیابی این محصولات پیش از به‌کارگیری در هر منطقه ضروری است. به عنوان مثال نتایج تحقیق (Alijanian et al., 2017) نشان دهنده بیش‌برآورد جدی پایگاه MSWEP از بارش‌ها در سطح ایران بود که با نتایج تحقیق حاضر تفاوت جدی دارد و دلیل این امر به‌کارگیری نسخه قبلی این پایگاه اطلاعاتی در تحقیق مذکور بوده است. همچنین، ضروری است در کاربردهای مختلف به مبانی مورد استفاده در تولید اطلاعات پایگاه‌های بارش ماهواره‌ای مورد نظر توجه شود. به عنوان مثال در تولید اطلاعات GSMaP از داده‌های بارش روزانه استفاده می‌شود، در حالی که واسنجی اطلاعات ارائه شده در IMERG از داده‌های بارش ماهانه استفاده شده است (Ramadhan et al., 2023). لذا انتظار می‌رود در شرایط مشابه، اطلاعات GSMaP در مقیاس روزانه (ماهانه) دقت بالاتری (پایین‌تری) نسبت به IMERG داشته باشند که نتایج تحقیق حاضر نیز تا حدی نشان دهنده صحت این موضوع است.

۵- مراجع

- Alijanian M, Rakhshandehroo GR, Mishra AK, Dehghani M (2017) Evaluation of satellite rainfall climatology using CMORPH, PERSIANN-CDR, PERSIANN, TRMM, MSWEP over Iran. *International Journal of Climatology* 37(14):4896-4914
- Beck HE, Pan M, Roy T, Weedon GP, Pappenberger F, van Dijk AIJM, Huffman GJ, Adler RF, Wood EF (2019a) Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(1):207-224
- Beck HE, Wood EF, Pan M, Fisher CK, Miralles DG, van Dijk AIJM, McVicar TR, Adler RF (2019b) MSWEP V2 global 3-Hourly 0.1° precipitation: Methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 100(3):473-500
- Brown B, Stein J, Brooks H, Casati B, Göber M, Ebert B, Ghelli A, Mittermaier M, Nurmi P, Stephenson D, Wilson C, Wilson L (2008) Recommendations for the verification and intercomparison of QPFs and PQPFs from operational NWP models. 2nd edn., WMO, WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification
- Chavoshian A, Katiraie-Boroujerdy PS (2019) Evaluation and application of different observational (land and satellite) datasets over Iran. *Water and Soil* 33(3):501-520 (In Persian)
- Dehaghani AM, Gohari A, Zareian MJ, Torabi Haghighi A (2023) A comprehensive evaluation of the satellite precipitation products across Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 46:101360
- Funk C, Peterson P, Landsfeld M, Pedreros D, Verdin J, Shukla S, Husak G, Rowland J, Harrison L, Hoell A, Michaelsen J (2015) The climate hazards infrared precipitation with stations- A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2(1):150066
- Gentilucci M, Barbieri M, Pambianchi G (2022) Reliability of the IMERG product through reference rain gauges in Central Italy. *Atmospheric Research* 278:106340
- Ghalami V, Saghafian B, Raziei T (2022) Investigating the effect of bias correction on quality improvement of NEX-GDDP downscaled precipitation data. *Iran-Water Resources Research* 18(1):68-83 (In Persian)
- GloH2O (2021) MSWEP V2.8 Technical Documentation.
- Hartmann H, Snow JA, Stein S, Su B, Zhai J, Jiang T, Krysanova V, Kundzewicz ZW (2016) Predictors of precipitation for improved water resources management in the Tarim River basin: Creating a seasonal forecast model. *Journal of Arid Environments* 125:31-42
- Huffman GJ, Bolvin DT, Nelkin EJ, Wolff DB, Adler RF, Gu G, Hong Y, Bowman KP, Stocker EF (2007) The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology* 8(1):38-55
- Huffman GJ, Stocker EF, Bolvin DT, Nelkin EJ, Tan J (2023) GPM IMERG final precipitation L3 half hourly 0.1 degree x 0.1 degree V07. Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)
- Iguchi T, Meneghini R, Awaka J, Kozu T, Okamoto K (2000) Rain profiling algorithm for TRMM Precipitation Radar data. *Advances in Space Research* 25(5):973-976
- JAXA (2024) GSMaP User Guide. Available online: <https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/guide.html> (accessed on 1 February 2024)
- Jolliffe IT, Stephenson DB (2012) Forecast verification: A practitioner's guide in atmospheric science. 2nd edn. John Wiley & Sons
- Joyce RJ, Janowiak JE, Arkin PA, Xie P (2004) CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology* 5(3):487-503
- Kaboli S, Hekmatzadeh AA, Darabi H, Haghighi AT (2021) Variation in physical characteristics of rainfall in Iran, determined using daily rainfall concentration index and monthly rainfall percentage index. *Theoretical and Applied Climatology* 144(1):507-520
- Kidd C, Huffman G (2011) Global precipitation measurement. *Meteorological Applications* 18(3):334-353
- Kirschbaum DB, Huffman GJ, Adler RF, Braun S, Garrett K, Jones E, McNally A, Skofronick-Jackson G, Stocker E, Wu H, Zaitchik BF (2017) NASA's remotely sensed precipitation: a reservoir for applications users. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98(6):1169-1184
- Kubota T, Aonashi K, Ushio T, Shige S, Takayabu YN, Kachi M, Arai Y, Tashima T, Masaki T, Kawamoto N, Mega T, Yamamoto MK, Hamada A, Yamaji M,

- Liu G, Oki R (2020) Global satellite mapping of precipitation (GSMaP) products in the GPM era. In: Levizzani V, Kidd C, Kirschbaum DB, Kummerow CD, Nakamura K, Turk FJ (eds) *Satellite Precipitation Measurement: Volume 1*. Springer International Publishing, Cham, pp 355-373
- Kubota T, Shige S, Hashizume H, Aonashi K, Takahashi N, Seto S, Hirose M, Takayabu YN, Ushio T, Nakagawa K, Iwanami K, Kachi M, Okamoto K (2007) Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45(7):2259-2275
- Kubota T, Aonashi K, Ushio T, Shige S, Yamaji M, Yamamoto M, Hirose H, Takayabu Y (2021) A new version of Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) product released in December 2021. In: EGU General Assembly Conference
- Lanza LG, Stagi L (2008) Certified accuracy of rainfall data as a standard requirement in scientific investigations. *Advances in Geosciences* 16:43-48
- Li Z, Tang G, Kirstetter P, Gao S, Li JLF, Wen Y, Hong Y (2022) Evaluation of GPM IMERG and its constellations in extreme events over the conterminous united states. *Journal of Hydrology* 606:127357
- Liu X, Yang T, Hsu K, Liu C, Sorooshian S (2017) Evaluating the streamflow simulation capability of PERSIANN-CDR daily rainfall products in two river basins on the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences* 21:169-181
- Mayor YG, Tereshchenko I, Fonseca-Hernández M, Pantoja DA, Montes JM (2017) Evaluation of error in IMERG precipitation estimates under different topographic conditions and temporal scales over Mexico. *Remote Sensing* 9(5):503
- Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, Albergel C, Arduini G, Balsamo G, Boussetta S, Choulga M, Harrigan S et al. (2021) ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data* 13(9):4349-4383
- Najafi MS, Akbari Moghadam Sani S (2022) Evaluation the performance of three gridded datasets in estimating the time series of extreme precipitation in Iran. *Climate Change Research* 3(11):79-98 (In Persian)
- Najafi MS, Alizadeh O (2023) Climate zones in Iran. *Meteorological Applications* 30(5):e2147
- Ramadhan R, Marzuki M, Yusnaini H, Muharsyah R, Tangang F, Vonnisa M, Harmadi H (2023) A preliminary assessment of the GSMaP version 08 products over Indonesian maritime continent against gauge data. *Remote Sensing* 15(4):1115
- Saha S, Moorthi S, Pan H-L, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, Kistler R, Woollen J, Behringer D (2010) The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91(8):1015-1058
- Saouabe T, Naceur KA, El Khalki EM, Hadri A, Saidi ME (2022) GPM-IMERG product: A new way to assess the climate change impact on water resources in a Moroccan semi-arid basin. *Journal of Water and Climate Change* 13(7):2559-2576
- Sharifi E, Eitzinger J, Dorigo W (2019) Performance of the state-of-the-art gridded precipitation products over mountainous terrain: a regional study over Austria. *Remote Sensing* 11(17):2018
- Sorooshian S, Hsu K-L, Gao X, Gupta HV, Imam B, Braithwaite D (2000) Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81(9):2035-2046
- Sun Q, Miao C, Duan Q, Ashouri H, Sorooshian S, Hsu K-L (2018) A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics* 56(1):79-107
- Tan J, Petersen WA, 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, 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
- Wang D, Liu J, Shao W, Mei C, Su X, Wang H (2021) Comparison of CMIP5 and CMIP6 multi-model ensemble for precipitation downscaling results and observational data: the case of Hanjiang river basin. *Atmosphere* 12(7):867
- WMO (2012) *Guide to meteorological instruments and methods of observation*
- Xie W, Yi S, Leng C, Xia D, Li M, Zhong Z, Ye J (2022) The evaluation of IMERG and ERA5-Land daily precipitation over China with considering the influence of gauge data bias. *Scientific Reports* 12(1):8085
- Xin Y, Yang Y, Chen X, Yue X, Liu Y, Yin C (2022) Evaluation of IMERG and ERA5 precipitation

- products over the Mongolian Plateau. *Scientific Reports* 12(1):21776
- 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
- Yazdandoost F, Moradian S, Izadi A, Bavani AM (2020) A framework for developing a spatial high-resolution daily precipitation dataset over a data-sparse region. *Heliyon* 6(9):e05091
- Zhang L, Li X, Cao Y, Nan Z, Wang W, Ge Y, Wang P, Yu W (2020) Evaluation and integration of the top-down and bottom-up satellite precipitation products over mainland China. *Journal of Hydrology* 581:124456