

Comparative analysis of the accuracy of satellite precipitation products in Mazandaran province: quantitative and qualitative evaluation with emphasis on station data

Sedigheh Bararkhanpour Ahmadi^۱, Reza Norooz Valashedi^{۱*}, Mehdi Nadi^۱, Khalil Ghorbani^۱, Karim Solaimani^۱

^۱. Dep of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.

^۲. Dep of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

* Corresponding Author: r.norooz@sanru.ac.ir

Abstract

Introduction: Estimation of spatiotemporal patterns of precipitation is difficult in Mazandaran province due to several factors, including the lack of ground observations, diverse climate zones, and extreme mountain slopes. Satellite precipitation products can provide a suitable solution for measuring the amount of precipitation, especially in areas with scattered ground stations, and provide a new approach to observe precipitation globally with remote sensing. However, despite the wide use of these products in various fields of study, the quantitative evaluation of these products is a fundamental challenge due to their inherent error and uncertainty, which should be considered in different temporal and spatial scales before their direct use.

Materials and methods: In the first step, CHIRPS, CMORPH, SM²RAIN, PERSIANN-CDR and IMERG gridded precipitation products were extracted from the database of each product in NetCDF format at the global level. Then, precipitation data for each product was selected for grids located in Mazandaran province by coding in the R-programming environment and Geographic Information System (GIS). In the next step, the evaluation and comparison of these products against ۱۰ synoptic stations in the Mazandaran province at the station-grid and regional spatial scales and monthly and annual time scales using the statistical evaluation criteria of Spearman's correlation coefficient (CC), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAD), Kling-Gupta efficiency (KGE) and Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), as well as drawing statistical diagrams (Taylor, etc.) were performed. In order to evaluate the grid to the station, the data of the closest grid to each synoptic station was extracted for each precipitation product and compared with the precipitation data of station in different time scales.

Results and discussion: The results of the regional evaluation of satellite precipitation products on a monthly and annual scale have shown that the IMERG and CMORPH products are more compatible, while the CHIRPS product performed well only in the dry months of the year. However, the accuracy of the products was higher on a monthly scale than on an annual scale. The Taylor diagram results indicated relatively high accuracy of IMERG, CHIRPS and CMORPH products (correlation > 0.7) at stations located in coastal areas and relatively low accuracy at high altitudes (correlation < 0.5). While for the PERSIAN product, the data accuracy was low for all regions, with a negative correlation in coastal areas. However, the results of the evaluation of precipitation products at the station level showed the better performance of the IMERG product and then CMORPH ($CC = 0.7$ and $RMSE = 2.4$ mm) in estimating monthly precipitation mainly in the eastern half of the province. While the lowest accuracy and the weakest performance was for the PERSIANN-CDR product. The highest CC value of precipitation products was equal to 0.8 , which was mainly in the eastern and coastal areas of the province, but the lowest value was related to the PERSIANN-CDR product ($CC = 0.2$). The RMSE values are mainly between 2 and 10 mm in the mountainous and eastern half of the province, respectively, and the lowest values are for the IMERG and CMORPH products. The values of KGE and NSE were also closer to the optimal value mainly in the coastal and eastern areas ($NSE = 0.5$ and $KGE = 0.7$), which was better for the CMORPH product. However, the BIAS values for all products varied between (-4) - 7 mm, which was underestimated in coastal and low-altitude areas, but overestimated in high-altitude areas. Investigating the effect of the distance between the synoptic station and grid precipitation on the accuracy of the precipitation product has also shown that for the CMORPH, IMERG (in high areas) and SM²RAIN products, a low (higher) distance between the station and the grid has reduced (increased) the uncertainty. However, for most of the precipitation products, the significant increase in elevation has increased the uncertainty in satellite precipitation estimation.

Conclusion: The most accurate precipitation product in Mazandaran province includes the IMERG product. One of the main problems in the accuracy of precipitation products in this region is the complex topography (large height difference) and the proximity to the Caspian Sea. However, the use of modern methods such as remote sensing systems as a solution for estimating precipitation represents scientific advances in this field, and this can be used as a guide for decision-makers in climate and hydrological studies.

Keywords: Precipitation estimation, CHIRPS, IMERG, SM²RAIN, PERSIANN-CDR, CMORPH.

تحلیل تطبیقی دقت محصولات بارش ماهواره‌ای در استان مازندران: ارزیابی

کمی و کیفی با تأکید بر داده‌های ایستگاهی

صدیقه برارخانپور احمدی^۱، رضا نوروز ولاشدی^{۱*}، مهدی نادى^۱، خلیل قربانی^۲، کریم سلیمانی^۱

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

*نویسنده عهده دار مکاتبات: r.norooz@sanru.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: برآورد الگوهای مکانی-زمانی بارش در استان مازندران به دلیل عوامل متعددی از جمله فقدان مشاهدات زمینی، مناطق متنوع آب و هوایی و شیب‌های شدید کوهنگاری مشکل است. محصولات بارش ماهواره‌ای می‌توانند راه حلی مناسب برای اندازه‌گیری میزان بارش خصوصاً در نواحی با ایستگاه‌های زمینی پراکنده ارائه دهد و یک رویکرد جدید برای مشاهده بارش در سطح جهانی یا سنجش از دور ارائه می‌دهد. با این حال، علی‌رغم استفاده گسترده این محصولات در زمینه‌های مطالعاتی مختلف، ارزیابی کمی این محصولات به دلیل خطای ذاتی و عدم قطعیت آن‌ها یک چالش اساسی است که قبل از استفاده مستقیم از آن‌ها باید در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف مورد توجه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها: در گام اول، محصولات بارش شبکه‌ای CHIRPS، CMORPH، SM²RAIN، PERSIANN-CDR و IMERG از پایگاه داده مربوط به هر یک از محصولات با فرمت NetCDF در سطح جهانی استخراج گردید. سپس داده‌های بارش هر محصول برای شبکه‌های واقع در پهنه استان مازندران با کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی R و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انتخاب گردید. در گام بعد، به ارزیابی و مقایسه این محصولات در مقابل ۱۵ ایستگاه همدیدی در سطح استان مازندران در مقیاس‌های مکانی ایستگاه-شبکه و منطقه‌ای و مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه با استفاده از معیارهای ارزیابی آماری ضریب همبستگی اسپیرمن (CC)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAD)، کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) و کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و همچنین رسم نمودارهای آماری (تیلور و ...) پرداخته شد. به‌منظور ارزیابی شبکه به ایستگاه، داده‌های نزدیک‌ترین شبکه به هر ایستگاه همدیدی برای هر محصول بارش استخراج گردید و با داده‌های بارش آن ایستگاه در مقیاس‌های زمانی مختلف مقایسه گردید.

نتایج و بحث: نتایج بررسی منطقه‌ای محصولات بارش ماهواره‌ای در مقیاس ماهانه و سالانه بیانگر انطباق بیشتر محصولات CMORPH و IMERG بوده است درحالی‌که محصول CHIRPS تنها در ماه‌های خشک سال عملکرد مناسبی داشت. با این حال، دقت محصولات در مقیاس ماهانه بیشتر از سالانه بود. نتایج دیگرام تیلور بیانگر دقت نسبتاً بالای محصولات CHIRPS، CMORPH و IMERG (همبستگی ۰/۷-۰/۸) در ایستگاه‌های واقع در نواحی ساحلی و دقت نسبتاً پایین در ارتفاعات (همبستگی ۰/۳-۰/۵) بوده است. در حالی‌که برای محصول بارش PERSIANN، دقت داده‌ها برای تمامی مناطق پایین بوده به طوری‌که در نواحی ساحلی، مقدار همبستگی منفی داشت. با این حال، نتایج ارزیابی محصولات بارش در سطح ایستگاه‌ها بیانگر عملکرد بهتر محصول IMERG و سپس CMORPH ($RMSE=2.4$ mm و $CC=0.70, 0.8$) در برآورد بارش ماهانه عمدتاً در نیمه شرقی استان بود. در حالی‌که کمترین دقت و ضعیف‌ترین عملکرد برای محصول PERSIANN-CDR بوده است. بیشترین مقدار CC محصولات بارش برابر ۰/۸ بوده که عمدتاً در نواحی شرقی و ساحلی استان وجود داشت اما کمترین آن مربوط به محصول PERSIANN-CDR ($CC=0.05$) بوده است. مقادیر RMSE عمدتاً بین ۲ تا ۱۵ میلی‌متر به ترتیب در نواحی کوهستانی و نیمه شرقی استان متغیر بوده که کمترین آن برای محصول IMERG و CMORPH است. مقادیر KGE و NSE نیز عمدتاً در نواحی ساحلی و شرقی به مقدار بهینه نزدیک‌تر بوده است ($NSE=0.05$ و $KGE=0.01$) که برای محصول CMORPH بهتر بود. با این حال مقادیر BIAS برای همه محصولات در بین ۲-(-۴) میلی‌متر متغیر بوده که در نواحی ساحلی و کم ارتفاع دارای کم‌برآوردی اما در نواحی مرتفع دارای بیش‌برآوردی بوده است. بررسی تأثیر فاصله ایستگاه همدیدی و بارش شبکه‌ای بر روی دقت محصول بارش نیز نشان داده است که برای محصولات CMORPH، IMERG (در نواحی مرتفع) و SM²RAIN فاصله کم (زیاد) بین ایستگاه و شبکه باعث کاهش (افزایش) عدم قطعیت شده است. با این حال، برای اغلب محصولات بارش، افزایش قابل ملاحظه ارتفاع موجب افزایش عدم قطعیت در برآورد بارش ماهواره‌ای شده است.

نتیجه‌گیری: دقیق‌ترین محصول بارش در استان مازندران شامل محصول IMERG بوده است. یکی از مشکلات اصلی در دقت محصولات بارش در این منطقه، توپوگرافی پیچیده (اختلاف ارتفاع زیاد) و هم‌جواری با دریای خزر است. با این حال، استفاده از روش‌های نوین مانند سامانه‌های سنجش از دور، به‌عنوان راهکاری برای برآورد بارش، نشان‌دهنده پیشرفت‌های علمی در این حوزه است و این موضوع می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای تصمیم‌گیرندگان در مطالعات آب و هوایی و هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: برآورد بارش، CHIRPS، CMORPH، IMERG، SM²RAIN، PERSIANN-CDR.

۱- مقدمه

بارش یکی از پارامترهای اصلی چرخه آب در کره‌ی زمین و یک منبع آب ضروری برای حفظ زندگی انسان و اکوسیستم‌های زمین به شمار می‌رود (Mishra, ۲۰۲۳). اطلاعات بارندگی در جنبه‌های زندگی انسان مانند مزارع کشاورزی، آبیاری، ذخایر آب، کاهش حاصلخیزی خاک و غیره مورد نیاز است (Biswal, ۲۰۲۲). علاوه بر این، اطلاعات بارندگی برای پیش‌بینی بلایای آب و هواشناسی مانند سیل، رانش زمین، خشک‌سالی و غیره نیز مفید است. بنابراین در دسترس بودن آمار و اطلاعات دقیق بارش، امکان مدیریت بهتر و کارآمدتر منابع آب را فراهم می‌کند و متعاقب آن موجب برنامه‌ریزی‌های بهتر در جهت مقابله با تغییرات آب و هوایی می‌شود. با این حال، به دلیل الگوهای متنوع بارندگی و ظرفیت اندازه‌گیری محدود، اندازه‌گیری باران با مسائل و مشکلاتی همراه است. اندازه‌گیری میزان بارندگی را می‌توان با استفاده از باران‌سنج‌های رصدخانه‌ای و باران‌سنج‌های خودکار یا ایستگاه‌های هواشناسی خودکار انجام داد. باران‌سنج‌ها منابع اصلی اندازه‌گیری بارندگی در سطح زمین هستند (Sun et al., ۲۰۱۸). مشاهدات بارندگی زمینی که به طور مستقیم در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود، نسبتاً دقیق است؛ اما به دلیل پراکندگی ایستگاه‌های هواشناسی و توزیع نابرابر ایستگاه‌ها در سطح زمین، این مشاهدات کم و محدود است. در بسیاری از مناطق، توزیع و پراکندگی مکانی باران‌سنج‌ها ناکافی است (Gyasi-Agyei, ۲۰۲۰) که موجب می‌شود این مناطق فاقد آمار و اطلاعات بارندگی باشند. بنابراین، اندازه‌گیری بارندگی با استفاده از باران‌سنج دارای نقاط ضعفی از نظر تفکیک مکانی و زمانی است. همچنین به دلیل پراکندگی مکانی باران‌سنج‌ها به خصوص در مناطق کوهستانی صعب‌العبور و دور از دسترس و مناطقی که تنوع مکانی در آن‌ها بالا است، میزان بارندگی منطقه‌ای اغلب با دقت پایین همراه است (Savina et al., ۲۰۱۲). در حالی که مدل‌های هیدرولوژیکی و مدل‌سازی هیدرولوژیکی به داده‌های بارش پیوسته و با وضوح مکانی و زمانی بالا نیاز دارند که این امر تبدیل به یک معضل جدی شده است. برای دستیابی به داده‌های بارندگی همچنین می‌توان از مشاهدات مبتنی بر سنجش از دور استفاده کرد. تکنیک‌های سنجش از دور می‌تواند راه حلی برای اندازه‌گیری میزان بارندگی باشد. محصولات بارش ماهواره‌ای^۱ و راداری، یک رویکرد جدید برای مشاهده بارش در سطح جهانی با سنجش از دور ارائه می‌دهد. این محصولات دارای یک نقش اساسی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی روی سطح زمین بوده که در مطالعات مختلفی بهره گرفته شده (Gu et al., ۲۰۲۳; Hussein et al., ۲۰۲۳) و نیز به طور گسترده در مطالعات تغییرات آب و هوایی استفاده شده‌اند (Bai et al., ۲۰۲۰; Keikhosravi-Kiany et al., ۲۰۲۳). نمونه‌هایی از محصولات بارش ماهواره‌ای شامل محصولات CMORPH, CPC, CHIRPS, SM²RAIN, JIMERG, MSWEP و PERSIAN می‌باشند که در مطالعات مختلفی مورد استفاده و تحلیل قرار گرفته‌اند (Dehaghani et al., ۲۰۲۳; Khorrami et al., ۲۰۲۴; Nozarpour et al., ۲۰۲۴). این محصولات پوشش جهانی یا تقریباً جهانی ارائه می‌دهند، اما دارای چالش‌هایی از جمله سوگیری‌های شناخته شده و داده‌های از دست رفته مربوط به توپوگرافی، فصل، شدت بارش و مدار ماهواره می‌باشند (Maggioni et al., ۲۰۱۶). پوشش مکانی و زمانی بالا باعث می‌شود که محصولات بارش ماهواره‌ای در مناطق دورافتاده و کوهستانی با تراکم پایین باران‌سنج ارزش ویژه‌ای داشته باشند (Boluwade et al., ۲۰۱۷). تغییر اقلیم موجب افزایش وقوع باران‌های شدید و متعاقب آن وقوع سیلاب در حوضه‌های آبریز کشور ایران شده است؛ به طوری که در سال‌های اخیر، طوفان‌های شدید سیلاب‌ساز موجب جاری شدن سیل‌های مخرب در مناطق مختلف ایران شده و خسارت‌های مالی زیادی را به همراه داشته است. لذا دستیابی به اطلاعات دقیق بارش‌های شدید به منظور بررسی و تحلیل وقایع حدی هیدرولوژیکی ضروری است و داده‌های دقیق و قابل اعتماد بارش برای مطالعه تغییرپذیری بارندگی مهم هستند (Du et al.,

^۱ . Satellite Precipitation Products

۲۰۲۲؛) از این رو، استفاده از داده‌های سنجش از دور و ماهواره که بخش وسیعی را هم‌زمان پوشش می‌دهند، اجتناب ناپذیر است و داده‌های بارش را می‌توان علاوه بر ایستگاه‌های زمینی از منابع مختلف مانند ماهواره‌ها و محصولات آنالیز مجدد جمع‌آوری کرد. با این حال، هر منبع مزایا و معایب خاص خود را دارد، از جمله عدم قطعیت و دقت این روش‌ها مسئله‌ای است که می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد.

در دهه‌ی اخیر، بسیاری از محصولات سنجش از دور بارش ماهواره‌ای منتشر شده‌اند که راه جدیدی برای جمع‌آوری و دستیابی به مشاهدات بارش جهانی یا منطقه‌ای در اختیار قرار می‌دهند. محصولات بارش ماهواره‌ای به‌عنوان یک منبع اطلاعاتی مهم از بارش با وضوح زمانی و مکانی بالا، پتانسیل بالایی برای بهبود مدیریت منابع آب حوضه و مدل‌سازی هیدرولوژیکی به‌ویژه در مناطق پراکنده دارند. این محصولات می‌توانند تخمین‌های بارش پیوسته و زمانی کامل را در سطح جهانی ارائه دهند و به طور فزاینده‌ای به‌عنوان مکمل و جایگزین برای مشاهدات بارش ایستگاهی استفاده شوند (Chen & Wen, ۲۰۲۳). تجزیه و تحلیل بارش ماهواره‌ای موجب می‌شود پژوهشگران به درک درستی از الگو و روند بارش جهانی و منطقه‌ای دست یابند (Kunkel et al., ۲۰۱۶) و داده‌های بارش ماهواره‌ای در زمان واقعی، امکان شناسایی سریع و هشدار سیل را فراهم می‌کند (Meng et al., ۲۰۲۳)؛ با این حال، به‌عنوان یک روشی که به طور غیر مستقیم به اندازه‌گیری بارش می‌پردازد، دارای دقت‌های متفاوتی است. از طرفی مطالعات هیدرولوژیکی و هواشناسی، اطلاعات دقیق، پیوسته، بلندمدت، قابل اعتماد و توزیع یکنواخت بارش را می‌طلبد. با توجه به باران‌سنج‌های کم‌تراکم با داده‌های ناقص در کشورهای در حال توسعه، تعداد زیادی از محصولات بارش شبکه‌ای^۱ (GPPs) جای خود را به‌عنوان جایگزینی برای رکوردهای باران‌سنج پیدا کرده‌اند. با این حال، GPPها بسته به نوع داده، الگوریتم شبکه‌بندی و غیره، خطاهای ذاتی را در خود جای می‌دهند. از این رو، ارزیابی آن‌ها قبل از کاربرد بسیار مهم است (Dhungana et al., ۲۰۲۳).

پژوهشگران مختلفی به ارزیابی یا اعتبارسنجی داده‌های بارش ماهواره‌ای پرداخته‌اند؛ رستم‌زاده^۲ و همکاران (۲۰۲۰) به مقایسه داده‌های بارش ماهواره‌های GPM و TRMM با داده‌های بارش زمینی در غرب ایران با استفاده از شاخص‌های ارزیابی شامل ضریب تبیین و ضریب همبستگی پرداختند. نتایج بیانگر معنی‌دار بودن روابط بین داده‌های بارش ۱۰ ایستگاه در منطقه و ماهواره‌های GPM، TRMM بوده است. نتایج براری سیاه‌وشکلایی^۳ و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی دقت داده‌های سنجش از دور در برآورد متغیرهای بیلان آب از جمله بارش در حوضه آبریز تجن، استان مازندران، و مقایسه آن با داده‌های ایستگاه زمینی بیانگر دقت و همبستگی مناسب داده‌های سنجش از دور بوده است و استفاده از این داده‌ها روشی بسیار ارزان و نسبتاً دقیق است که استفاده از آن در حوضه‌های وسیع و فاقد ایستگاه زمینی مفید است. گیو^۴ و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی دقت ۸ محصول بارش ماهواره‌ای مختلف (CHIRPS, GSMaP, GPCP, GPM, MSWEP, PERSIAN, SM^۲RAIN) با استفاده از داده‌های روزانه بارندگی در بین سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۰۷ در حوضه رودخانه Xiangjiang (یک حوضه آبریز کوهستانی با آب و هوای مرطوب نیمه‌گرمسیری موسمی) واقع در جنوب چین پرداختند. ارزیابی در مقیاس مکانی (مقیاس‌های شبکه-ایستگاه و حوضه) و زمانی (مقیاس‌های سالانه و فصلی) انجام شد. نتایج بر اساس معیارهای آماری کلی نشان داد که محصولات GSMaP و MSWEP به‌عنوان دو محصول بارش ماهواره‌ای با بهترین عملکرد رتبه‌بندی می‌شوند در حالی که محصولات CHIRPS و SM^۲RAIN بدترین عملکرد یا پایین‌ترین دقت را دارا بودند. لی^۵ و همکاران (۲۰۲۳) ۴ محصول بارش ماهواره‌ای شامل GSMaP-NRT, GSMaP-Gauge, IMERG, و MSWEP در برابر مشاهدات روزانه بارندگی ۲۳۴۴ ایستگاه در چین را در بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۰۱ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که MSWEP

۱ . Gridded Precipitation Product

۲ . Rostamzadeh

۳ . Bararisiavashkolaei

۴ . Guo

۵ . Li

بهترین عملکرد را با ضریب همبستگی $R=0.78$ ، $RMSE=5$ و اریب نسبی $=5\%$ درصد داشته است. دهاقانی^۱ و همکاران (۲۰۲۳) به منظور ارزیابی دقت محصولات بارش ماهواره‌ای در مدت زمان و دوره بازگشت‌های مختلف و همچنین عملکرد آن‌ها در ارتفاعات و اقلیم‌های مختلف، از ۳ محصول بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CCS، TRMM-3B42RT و CMOROH در مقیاس‌های زمانی ساعتی، روزانه، ماهانه و سالانه در ۵۲ ایستگاه سینوپتیک ایران استفاده نمودند. به منظور ارزیابی دقت این محصولات از ضریب همبستگی پیرسون^۲ (R_p)، ریشه نسبی میانگین مربعات خطا ($RRMSE$) و اریب نسبی ($RBias$) استفاده شد. نتایج نشان داد ماهواره CMORPH بالاترین دقت را داشته است. همچنین محصولات TRMM و CMORPH بارش را به ترتیب ۵۶ و ۸ درصد کمتر برآورد کردند در حالی که PERSIANN-CCS بارش را ۱۴۳ درصد بیش از حد برآورد نمود. اما محصول بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CCS در تشخیص وقوع یا عدم وقوع بارندگی، عملکرد بالاتری نسبت به سایر محصولات داشته است. شعبانکاره^۳ و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی محصول بارش ماهواره‌ای IMERG در استان فارس با استفاده از باران‌سنج‌های روزانه به‌عنوان داده‌های مرجع به منظور یافتن روابط بین عدم قطعیت‌های محصول بارشی ماهواره‌ای پرداختند؛ نتایج نشان داد که محصول IMERG میزان بارندگی سبک (کم) را بیش از حد برآورد می‌کند و برای بارش‌های شدید کم‌برآوردی دارد. با این حال بهترین عملکرد را در محدوده بارش ۸۰-۴۰ میلی‌متر بر روز نشان می‌دهد. همچنین دقت محصول در ماه‌های مختلف سال متفاوت بوده است. یانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای دقت محصولات بارش IMERG-F، ERA^۵، GSMaP-G و FY4A-QPE را از سه جنبه زمان، مکان و بارش شدید ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد استفاده از داده‌های ERA^۵ می‌تواند برای مطالعه روندهای هواشناسی و هیدرولوژیکی در منطقه، داده‌های IMERG-F در تجزیه و تحلیل بارش شدید و داده‌های GSMaP-G در بررسی رویدادهای بارش در منطقه مناسب است. همچنین در زمان استفاده از محصولات بارش در ارتفاعات بالا می‌بایست به دست کم گرفتن^۵ بارش توجه نمود. دولان^۶ و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد ۵ محصول بارش ماهواره‌ای (CHIRPS، IMERG، ERA^۵، LPM و EM) را در برابر مشاهدات بارش ۲۷ ایستگاه هواشناسی در کوهستان آسیا^۷ ارزیابی نمودند. عملکرد هر محصول در رابطه با ارتفاع و شاخص‌های شدید بررسی گردید. نتایج نشان داد که محصولات آنالیز مجدد مانند ERA^۵ دارای بیشترین بیش‌برآوردی بوده‌اند و محصولات مجموعه (Ensemble) مانند EM دارای همبستگی بالاتری و عدم قطعیت‌های کمتر با مشاهدات زمینی بوده است. ایت‌تاکاوی^۸ و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی دقت ۴ محصول بارش مبتنی بر ماهواره (PERSIANN-CDR، GPM، TRMM و CHIRPS) در چهار حوضه از شمال مراکش با استفاده از معیارهای ارزیابی آماری پرداختند. این ارزیابی در سه مقیاس زمانی (روزانه، ماهانه و سالانه) در بین سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۰۰ انجام گردید. نتایج نشان داد در هر ۳ مقیاس مکانی، داده‌های روزانه دارای عملکرد ضعیفی بوده با این حال، محصولات GPM و TRMM در مقیاس‌های ماهانه و سالانه بهتر از سایر محصولات بارش عمل کردند.

تخمین الگوهای مکانی-زمانی بارش متوسط و شدید در استان مازندران توسط عوامل متعددی از جمله فقدان مشاهدات زمینی، مناطق متنوع آب و هوایی و شیب‌های شدید کوه‌نگاری چالش برانگیز است. مشاهدات نشان داده است که فراوانی بارش‌های شدید در استان مازندران افزایش یافته اما در مقابل، تعداد وقایع بارش سبک یا کم کاهش یافته است. با این حال، مطالعات بارندگی کمتری در این ناحیه انجام شده است که عمدتاً به دلیل دشواری نظارت بر بارش در این منطقه خصوصاً نواحی کوهستانی به دلیل اندازه

۱ . Dehaghani

۲ . Pearson

۳ . Shabankareh

۴ . Yang

۵ . underestimating

۶ . Dollan

۷ . High Mountain Asia

۸ . Et-Takaouy

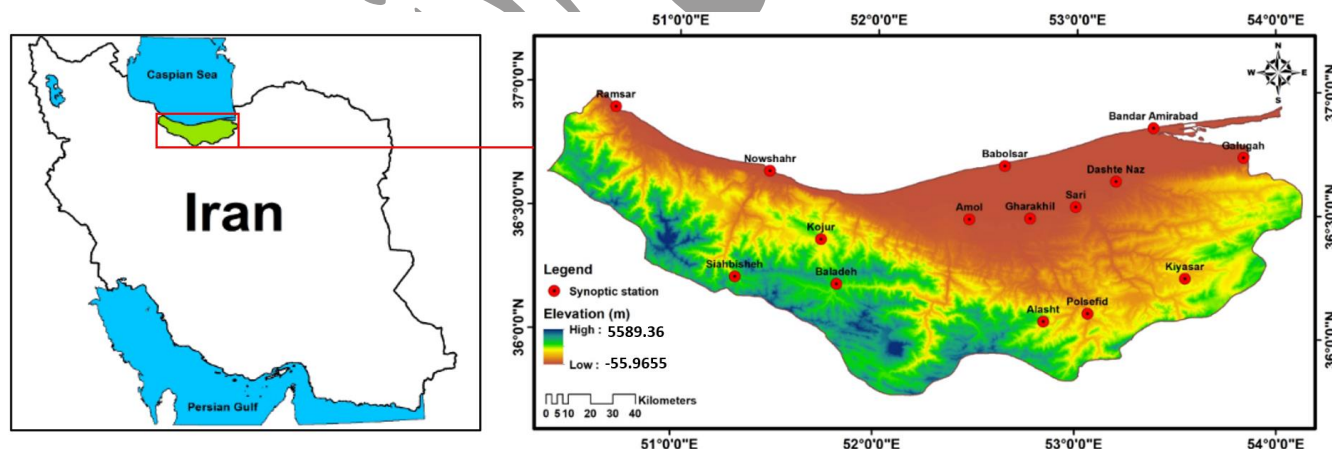
وسیع و پراکندگی ایستگاه هواشناسی است. لذا ارزیابی کیفیت و قابلیت اطمینان محصولات بارش چند منبعی قبل از تجزیه و تحلیل روندها و الگوهای آن‌ها در چنین منطقه‌ای اساسی است (Dollan et al., ۲۰۲۴).

در نهایت، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بلایای مکرر ناشی از بارش‌های شدید و سیلاب در نواحی مختلف استان مازندران به‌عنوان یک مسئله اساسی و دائمی مطرح است. از این رو، ارزیابی جامع محصولات بارش ماهواره‌ای در این منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این مطالعه، مقایسه محصولات بارش ماهواره‌ای مختلف با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاهی و ارزیابی عملکرد بارش جهانی در سطح استان مازندران است. این مقایسه به شیوه‌ای مکانی-زمانی و در سطح منطقه‌ای و شبکه‌ای انجام شده و برای بررسی دقت محصولات بارش سنجش از دور ماهواره‌ای از شاخص‌های ارزیابی آماری بهره‌برداری شده است. نتایج حاصل از این ارزیابی می‌تواند به بهبود مدیریت بلایای طبیعی و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با منابع آب در استان مازندران کمک شایانی نماید و نوآوری‌های جدیدی در زمینه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی و تحلیل بارش‌ها ارائه دهد.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در این پژوهش، پهنه‌ی استان مازندران است (شکل ۱). استان مازندران با مساحتی بالغ بر ۲۳۸۴۲ کیلومتر مربع در شمال کشور ایران و در محدوده ۲۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این منطقه در شمال ایران و در ساحل دریای خزر واقع شده و در بین رشته کوه‌های البرز در شمال و کوه‌های تالش در غرب قرار گرفته است. بیشترین ارتفاع این محدوده ۵۵۹۵ متر و کمینه ارتفاع آن ۲۱- متر از سطح دریاهای آزاد است (Farsadnia et al., ۲۰۱۲). آب و هوای استان مازندران به دلیل ویژگی‌های خاص جغرافیایی آن و فاصله کم بین مناطق کوهستانی و دریا، همراه با بارش‌های سالانه نسبتاً قابل توجه (۷۱۰ میلی‌متر در سال) و دمای معتدل (۱۷ درجه سلسیوس) در طول سال است. با حرکت از مناطق غربی به سمت مناطق شرقی استان، از مقدار بارش کاسته شده و بر میزان دمای هوا افزوده می‌شود.



شکل ۱. نقشه‌ی منطقه مطالعاتی و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی متعلق به سازمان هواشناسی و محصولات بارش ماهواره‌ای سنجش از دور است. محصولات بارش مبتنی بر ماهواره که از تنوع بالایی نیز برخوردارند، قادرند به طور مؤثر برآورد بارش را به مناطقی که با کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری متداول یا توزیع ناهمگون و نامنظم آن‌ها مواجه هستند، گسترش دهند. به دلیل تأثیر عوامل منطقه‌ای مانند گردش هوا و توپوگرافی، کاربرد داده‌های بارش به دست آمده توسط ماهواره‌ها در مناطق مختلف، تفاوت‌های آشکاری دارد. در مطالعه حاضر، از محصولات بارش ^۱CHIRPS، ^۲CMORPH، ^۳IMERG، PERSIANN-CDR و ^۴SM^۲RAIN استفاده شد. جزئیات مربوط به محصولات ماهواره‌ای بارش از جمله وضوح مکانی و بازه‌ی زمانی در جدول ۱ ارائه گردید.

جدول ۱. اطلاعات مکانی و زمانی محصولات بارش ماهواره‌ای مورد استفاده

منبع	دوره‌ی زمانی	وضوح مکانی (درجه)	نام اختصاری	محتوای بارش
Skofronick-Jackson et al., (۲۰۱۸)	۲۰۰۰- حال	۰/۱	IMERG	Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM Final run V06B
Joyce & Xie (۲۰۱۱)	۱۹۹۸- حال	۰/۲۵	CMORPH	Climate Prediction Center (CPC) MORPHing technique bias corrected (CRT)
Funk et al. (۲۰۱۵)	۱۹۸۱- حال	۰/۰۵	CHIRPS	Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations
Ashouri et al. (۲۰۱۵)	۲۰۰۷- حال	۰/۱	SM ^۲ RAIN-ASCAT	Soil Moisture TO RAIN
Ashouri et al. (۲۰۱۵)	۱۹۸۳- حال	۰/۲۵	PERSIANN-CDR	Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network

محصولات CHIRPS توسط شبکه سامانه‌های هشدار اولیه قحطی^۵ USGS و گروه خطرات آب و هوا در دانشگاه کالیفرنیا توسعه داده شد (Funk et al., ۲۰۱۵). این محصول از سال ۱۹۸۱ محصولات بارشی را با وضوح مکانی بالای ۰/۰۵ درجه در سراسر جهان ارائه کرده است. وضوح فضایی خوب و دوره‌های ثبت شده نسبتاً طولانی موجب استفاده گسترده از محصولات CHIRPS در سال‌های اخیر شده است. (Nicholson & Klotter, ۲۰۲۱; Aksu & Akgül, ۲۰۲۰). این مطالعه محصول نهایی CHIRPS نسخه ۲.۰ (از این پس CHIRPS) را ارزیابی می‌کند.

محصولات بارش CMORPH توسط مرکز پیش‌بینی آب و هوا^۶ از اداره ملی اقیانوسی و جوی^۷ (NOAA) منتشر شد (Joyce et al., ۲۰۰۴). CMORPH بارندگی جهانی را با وضوح مکانی-زمانی نسبتاً بالای ۸ کیلومتر و وضوح زمانی ۰/۵ ساعت تولید می‌کند. در این مطالعه، محصول روزانه CMORPH مشتق شده از سوابق داده‌های آب و هوایی از اداره ملی اقیانوسی و جوی با سایر محصولات بارش ماهواره‌ای ارزیابی شد.

محصول بارشی IMERG توسط ناسا با همکاری JAXA به‌عنوان جانشین TMPA^۸ ناسا توسعه یافته است و یکی دیگر از محصولات بارشی پرکاربرد مأموریت GPM است که با الگوریتم IMERG تولید شده است (Huffman et al., ۲۰۱۵). آخرین بارش IMERG، IMERG نسخه ۰۶، که در سال ۲۰۱۹ منتشر شد، دوره TRMM را با الگوریتم IMERG دوباره پردازش کرد و مقیاس زمانی طولانی‌تری از بارش IMERG از سال ۲۰۰۰ ایجاد کرد.

۱. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

۲. Climate Prediction Center Morphing Technique

۳. Integrated Multi-Satellite Retrievals from GPM

۴. Soil Moisture TO RAIN

۵. Famine Early Warning Systems Network

۶. Climate Prediction Center

۷. National Oceanic and Atmospheric Administration

۸. TRMM multi-satellite precipitation analysis

محصول PERSIANN توسط مرکز آب و هواشناسی و سنجش از دور^۱ (CHRS) در دانشگاه کالیفرنیا توسعه یافته است (Ashouri et al., ۲۰۱۵). PERSIANN نرخ بارندگی را بر اساس دمای بالای ابر به دست آمده از تصاویر IR برآورد می‌کند (Nguyen et al., ۲۰۱۸). PERSIANN CDR^۲، با تأخیر زمانی ۳ ماهه، یک محصول کالیبره شده روزانه بلندمدت (از سال ۱۹۸۳ تا کنون) با وضوح مکانی ۰/۲۵ درجه است و معمولاً برای مطالعات روند آب و هواشناسی استفاده می‌شود. محصول بارش PERSIANN-CDR برای تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای در این مطالعه استفاده شد.

SM²RAIN یک روش جدید توسعه یافته "bottom-up" است که بارش را در مناطق وسیعی از مشاهدات رطوبت خاک تخمین می‌زند (Brocca et al., ۲۰۱۹). برخلاف رویکردهای تولیدی محصولات بارش ماهواره‌ای دیگر که در بالا توضیح داده شد، این محصول از تخمین خواص ابرها در روش‌های "bottom-up" اجتناب می‌کند و لایه خاک را به عنوان باران سنج طبیعی در نظر می‌گیرد. SM²RAIN-ASCAT به طور مشترک توسط گروهی از مؤسسات در اروپا از داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای پراکندگی پیشرفته^۳ (ASCAT) از طریق الگوریتم SM²RAIN با وضوح مکانی ۰/۱ درجه یا ۱۰ کیلومتر در مقیاس جهانی تولید می‌شود (Lai et al., ۲۰۲۲). در این مطالعه، SM²RAIN-ASCAT روزانه در ارزیابی مقایسه‌ای استفاده شد.

به منظور مقایسه بارش برآورد شده از سنجنده‌های مختلف مورد مطالعه و بارش مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی، داده‌های بارش برای هر ایستگاه زمینی با داده‌های بارش نزدیک‌ترین نقطه یا شبکه از هر سنجنده به آن ایستگاه (در محیط GIS) مقایسه شد. با این حال، توزیع داده‌های شبکه‌ای محصول CHIRPS در سطح استان به گونه‌ای است که در نوار ساحلی نیمه شرقی استان، داده‌ی شبکه‌ای بارش وجود ندارد؛ به همین دلیل از مقایسه داده‌های بارش CHIRPS نزدیک‌ترین شبکه به ایستگاه برای دو ایستگاه بابلسر و امیرآباد که در نواحی ساحلی شرق استان قرار دارند، صرف نظر گردید. اطلاعات آماری ایستگاه‌های زمینی و فاصله نقاط شبکه‌ای منتخب از هر سنجنده به ایستگاه مورد هدف در جدول ۲ ارائه شد.

جدول ۲. اختلاف بین موقعیت و فاصله ایستگاه‌های سینوپتیک و نزدیک‌ترین ایستگاه شبکه‌ای برای سنجنده‌های مختلف به هر ایستگاه

ردیف	ایستگاه سینوپتیک		فاصله با ایستگاه زمینی (km)				
	Lat - Lon	نام ایستگاه	CHIRPS	CMORPH	IMERG	PERSIANN-CDR	SM ² RAIN
۱	۳۶/۰۷ - ۵۲/۸۴	آلاشت	۱/۷	۶/۷	۶	۶/۷	۵
۲	۳۶/۴۸ - ۵۲/۴۷	آمل	۰/۹	۱۴/۲	۳/۷	۱۴/۲	۳/۶
۳	۳۶/۷ - ۵۲/۶۴	بابلسر	-	۸/۳	۵	۸/۳	۳/۸
۴	۳۶/۲۱ - ۵۱/۸۱	بلده	۲	۱۱	۱۲/۸	۱۱	۱/۴
۵	۳۶/۸۵ - ۵۳/۳۹	بندر امیرآباد	-	۲/۳	۹	۲/۳	۶/۳
۶	۳۶/۷۴ - ۵۳/۸۴	گلوگاه	۱/۷	۱۳	۷	۱۳	۵/۳
۷	۳۶/۴۹ - ۵۲/۷۷	قراخیل	۱/۴	۱۵/۵	۶/۶	۱۵/۵	۲/۹
۸	۳۶/۲۵ - ۵۳/۵۵	کیاسر	۳	۱۵	۷	۱۵	۶/۷
۹	۳۶/۳۹ - ۵۱/۷۳	کجور	۱/۶	۹/۴	۱۰	۹/۴	۲/۸
۱۰	۳۶/۶۶ - ۵۱/۴۷	نوشهر	۴	۹	۵/۲	۹	۷/۳
۱۱	۳۶/۱۰ - ۵۳/۰۶	پل سفید	۲/۶	۶	۳/۴	۶	۳/۴
۱۲	۳۶/۹۰ - ۵۰/۶۸	رامسر	۳/۳	۶/۲	۱/۵	۶/۲	۱/۵
۱۳	۳۶/۵۴ - ۵۲/۹۹	ساری	۲/۴	۱۴/۸	۹/۶	۱۴/۸	۳/۹
۱۴	۳۶/۶۴ - ۵۲/۲۰	دشت ناز	۲/۷	۶/۹	۱۱	۶/۹	۴/۴

^۱ . Center for Hydrometeorology and Remote Sensing

^۲ . Climate Data Record

^۳ . Advanced Scatterometer

۱۵	۳۶/۲۳ - ۵۱/۳۰	سیاه‌بیشه	۲	۱۳/۴	۷/۶	۱۳/۴	۳/۴
تعداد نقطه ایستگاهی برای منطقه	۱۵	۸۹۴	۶۹	۶۹	۴۵	۲۵۵	

۳-۲- شاخص‌های ارزیابی عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای

به منظور ارزیابی جامع از دقت و عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی رتبه اسپیرمن^۱ (CC)، ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، میانگین خطای مطلق^۳ (MAE)، اربب (BIAS)، کارایی کلینگ-گوپتا^۴ (KGE) و کارایی نش-ساتکلیف^۵ (NSE) استفاده گردید. روابط و حدود بهینه این معیارها در جدول ۳ ارائه گردید.

جدول ۳. معیارهای ارزیابی مورد مطالعه در پژوهش حاضر و روابط ریاضی آن (Guo et al., ۲۰۲۳)

مقدار بهینه	محدوده	رابطه	معیار آماری
۱	$(-1) - 1$	$CC = \frac{COV_{R(X)R(Y)}}{\sigma_{R(X)}\sigma_{R(Y)}}$	ضریب همبستگی اسپیرمن
۰	$(-\infty) - (+\infty)$	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X - Y)^2}{N}}$	ریشه میانگین مربعات خطا
۰	$0 - (+\infty)$	$MAD = \frac{\sum X - Y }{N}$	میانگین خطای مطلق
۱	$(-\infty) - 1$	$KGE = 1 - \sqrt{\frac{(R-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2}{3}}$	کارایی کلینگ-گوپتا
۱	$(-\infty) - 1$	$NSE = 1 - \frac{\sum (Y - X)^2}{\sum (Y - \mu_Y)^2}$	کارایی نش-ساتکلیف
۰	$(-\infty) - (+\infty)$	$1/N \sum (X - Y)$	اربب

که در آن N = تعداد مشاهدات در سری زمانی، X = مقدار بارش ماهواره‌ای، Y = مقدار بارش مشاهده شده، μ = میانگین X ، $Cov_{XY} =$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \mu)^2}{N}} \quad \beta = \mu_X / \mu_Y = \text{انحراف معیار} = \sigma, \quad Cov_{XY} = \frac{\sum (X - \mu_X)(Y - \mu_Y)}{N} = Y \quad \text{کوواریانس } X \text{ و } Y$$

$$\gamma = \left(\frac{\sigma_X}{\mu_X}\right) / \left(\frac{\sigma_Y}{\mu_Y}\right)$$

برای نشان دادن همبستگی رتبه‌ای بین دو متغیر از نمایه CC استفاده شد، که در اینجا CC رابطه خطی بین بارندگی مشاهده شده و بارندگی برآورد شده را نمایان می‌کند. RMSE و MAE به منظور مشخص کردن مقدار اختلاف بین بارش مشاهده شده و برآورد شده استفاده شد. RMSE تفاوت بین مجموعه داده مشاهده شده و شبکه‌بندی شده (محصولات بارش ماهواره) را اندازه‌گیری می‌کند و میانگین بزرگی خطا را تخمین می‌زند. مقدار RMSE نزدیک به صفر نشان دهنده تطابق بهتر بین مجموعه داده شبکه‌بندی شده و مشاهده شده است. BIAS الگوی کلی بارش برآورد شده را نشان می‌دهد و بیانگر انحراف میانگین پیش‌بینی‌ها از مقادیر واقعی است. مقدار مثبت (منفی) BIAS نشان دهنده تخمین بیش از حد (کم برآورد) توسط مجموعه داده شبکه‌بندی شده یا در اینجا محصول بارش ماهواره‌ای است در حالی که مقدار صفر برآورد کامل را نشان می‌دهد. هر چه مقدار BIAS به صفر نزدیک‌تر باشد، برآورد بهتر بارش را نشان می‌دهد. KGE، برای ارزیابی جامع تناسب بین بارش برآورد شده و بارش مشاهده شده و کیفیت مدل‌های پیش‌بینی استفاده می‌شود (Lamontagne et al., ۲۰۲۰). NSE یک معیار کارایی است که برای ارزیابی توانایی مدل در بازتولید داده‌های مشاهده شده یا پیش‌بینی بارش استفاده می‌شود (Vijay & Singh, ۲۰۱۷). هر معیار جنبه خاصی از عملکرد داده‌ها را

۱. Spearman's rank correlation coefficient

۲. Root Mean Square Error

۳. Mean Absolute Error

۴. Kling Gupta efficiency

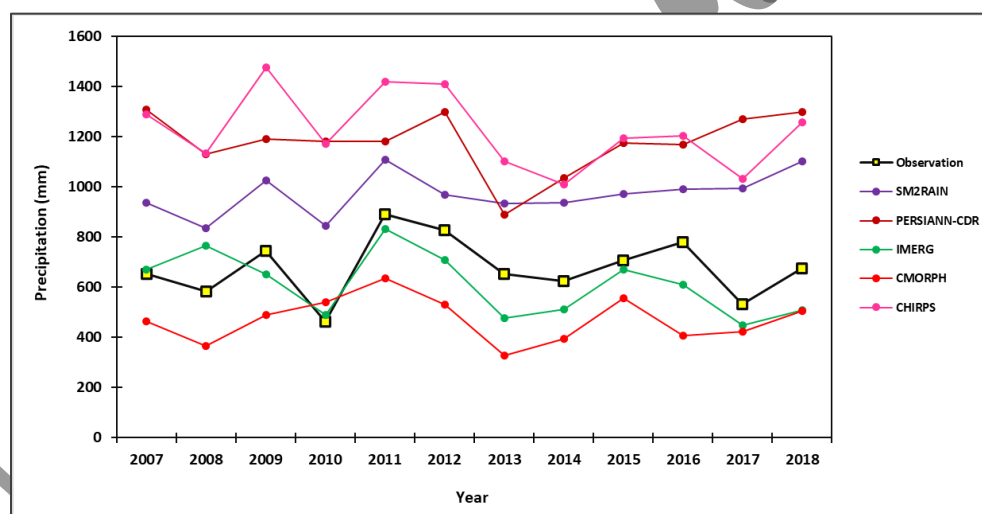
۵. Nash Sutcliffe efficiency

ارزیابی می‌کند؛ برای مثال، RMSE بر روی خطاهای بزرگ و MAE به طور یکنواخت به همه خطاها می‌پردازد، NSE و KGE به توزیع داده‌ها و روابط بین متغیرها حساس هستند و معیاری مانند Bias نیز به شناسایی خطاهای سامانمند در داده‌های پیش‌بینی کمک می‌کند. بنابراین، استفاده از معیارهای چندگانه عملکرد می‌تواند اعتبار نتایج ارزیابی را افزایش دهد و تصویر جامع‌تری از عملکرد محصول ارائه دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی دقت محصولات بارش ماهواره‌ای در مقیاس سالانه

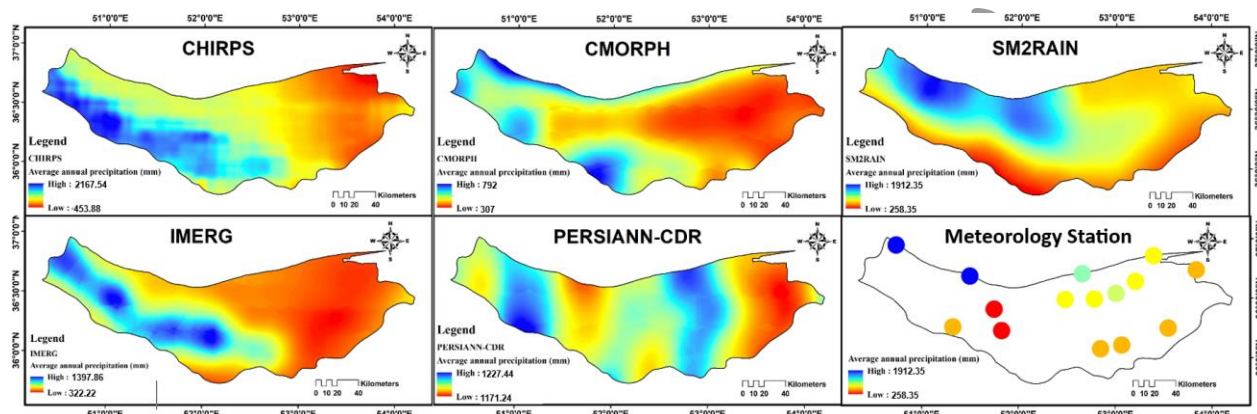
بررسی بارش سالانه منطقه‌ای برای داده‌های مشاهداتی ایستگاه زمینی و سنجنده‌های مختلف در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۸ (شکل ۲) نشان داده است که بارش برآورد شده توسط سنجنده‌های CHIRPS، PERSIAN-CDR و SM²RAIN دارای بیش‌برآوردی نسبت به بارش مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی است که از میان این سه سنجنده، بارش برآورد شده توسط CHIRPS تفاوت بیشتری با بارش سالانه مشاهداتی دارد. اما بارش حاصل از سنجنده‌های IMERG و CMORPH در اغلب سال‌ها (به‌جز سال ۲۰۰۸ برای IMERG و سال ۲۰۱۰ برای CMORPH) دارای کم‌برآوردی است. با این حال، نزدیک‌ترین داده بارش سالانه به داده‌های ایستگاهی، مربوط به سنجنده IMERG است.



شکل ۲. نمودار تحلیل میانگین بلندمدت بارش سالانه (۲۰۰۷-۲۰۱۸) منطقه‌ای برای بارش ایستگاهی و بارش حاصل از سنجنده‌های مورد مطالعه

به منظور بررسی تغییرات مکانی محصولات بارش ماهواره‌ای مختلف، نقشه توزیع مکانی برآوردهای میانگین بارش سالانه (شکل ۳) همراه با بارش ایستگاهی در سطح استان مازندران در بین سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۸ تهیه و مقایسه گردید. مقایسه نقشه‌های بارش سالانه حاصل از سنجنده‌های CHIRPS، CMORPH، SM²RAIN، IMERG و PERSIAN-CDR در مقابل داده‌ی ایستگاهی نشان داده است که توزیع مکانی بارش حاصل از پایگاه‌های CHIRPS و IMERG مشابه هم بوده و نواحی کم بارش و پر بارش تقریباً منطبق با یکدیگر هستند؛ به گونه‌ای که در این سنجنده‌ها، نیمه شرقی استان از کمترین مقدار بارش و در مقابل نیمه غربی-جنوبی از بیشترین مقدار بارش برخوردار می‌باشند. برای سنجنده‌های CMORPH و SM²RAIN، الگوی تغییرات بارندگی تقریباً مشابه با داده‌ی ایستگاهی است. در حالی که نقشه مکانی بارش برای سنجنده PERSIAN دارای الگوی تغییرات متفاوت با داده‌ی ایستگاهی است. با این حال، مقدار تغییرات در محصولات مختلف (محدوده تغییرات) به طور قابل توجهی متفاوت است. CHIRPS یک مرکز

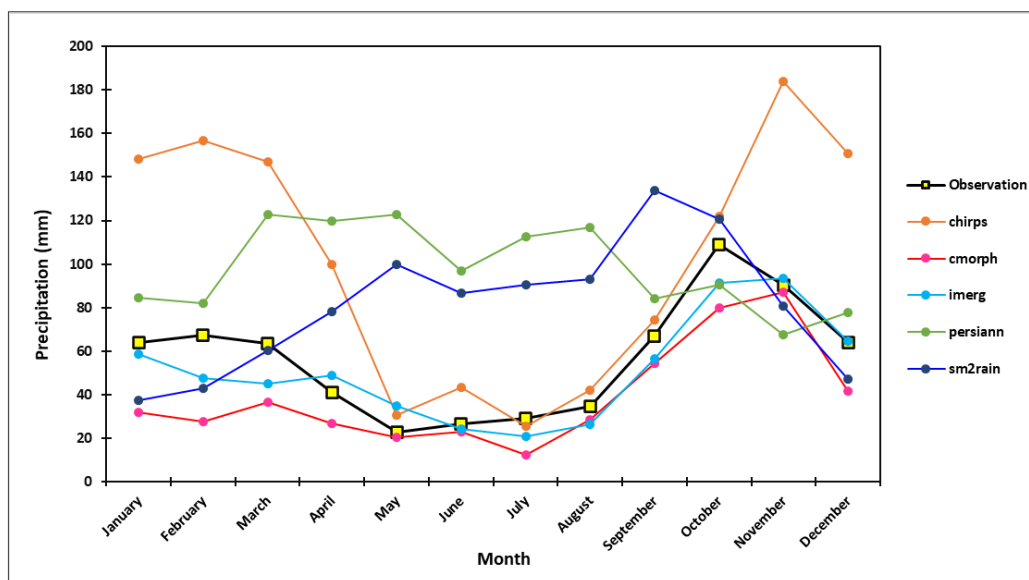
بارندگی (با بارش ۲۱۰۰ میلی‌متر) را نشان می‌دهد که در نواحی جنوب غربی توزیع شده است و ممکن است که یک سیگنال نادرست باشد که موجب بیش‌برآوردی بارش در این منطقه شده است. اما برعکس، CMORPH دارای کم‌برآوردی نسبت به بارش ایستگاهی (۷۹۲ میلی‌متر) برای بارش حداکثر است. برآورد میانگین بارندگی به ترتیب صعودی شامل CHIRPS (۱۳۱۰ میلی‌متر)، PERSIAN (۱۱۹۹ میلی‌متر)، SM²RAIN (۱۰۸۵ میلی‌متر)، IMERG (۸۵۹/۵ میلی‌متر)، Ground station (۷۷۲/۵ میلی‌متر) و CMORPH (۵۴۹/۵ میلی‌متر) است.



شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی میانگین بارش سالانه (۲۰۱۸-۲۰۰۷) استخراج شده از سنجنده و ایستگاه‌های زمینی

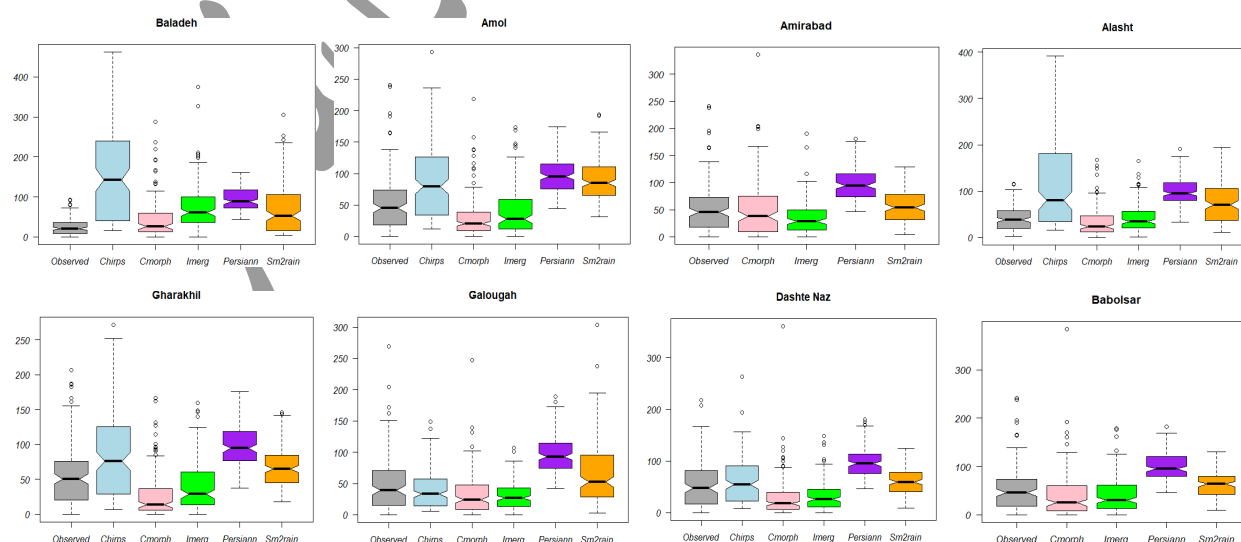
۲-۳- بررسی دقت محصولات بارش ماهواره‌ای در مقیاس ماهانه

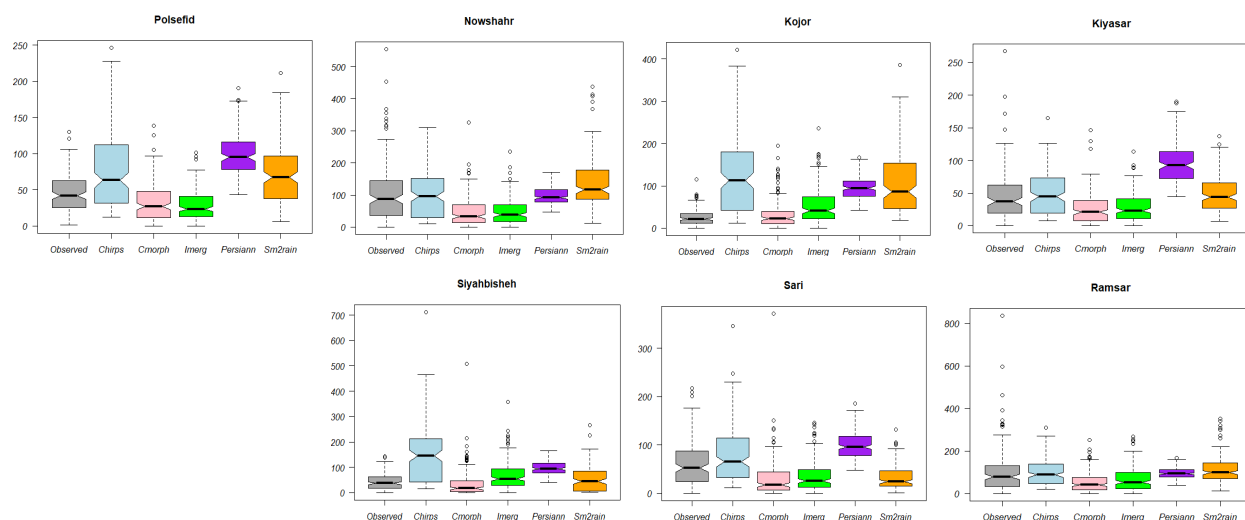
تحلیل داده‌های میانگین ماهانه بلندمدت منطقه‌ای برای داده‌های بارش ایستگاهی و سنجنده‌های مورد مطالعه (شکل ۴) نشان داده است که داده‌های CHIRPS در ماه‌های سرد (نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه، مارس و آوریل) دارای تفاوت بسیار زیادی (بیش‌برآوردی) با داده‌ای ایستگاهی بوده است. در حالی که در ماه‌های گرم، انطباق مناسبی با داده‌های بارش مشاهداتی دارد. بارش برآورد شده توسط سنجنده PERSIAN در اغلب ماه‌ها دارای بیش‌برآوردی نسبت به داده‌های بارش ایستگاهی بوده و تنها در ماه اکتبر و نوامبر دارای کم‌برآوردی است. با این حال، بارش حاصل از SM²RAIN الگوی رفتاری برعکس با CHIRPS در ماه‌های مختلف دارد به طوری که در ماه‌های گرم دارای بیش‌برآوردی و در ماه‌های سرد دارای کم‌برآوردی است. با این حال، مقدار بارش برآورد شده در ماه‌های سرد به بارش ایستگاهی نزدیک‌تر است. اما برای سنجنده‌های IMERG و CMORPH، مقدار بارش ماهانه برآورد شده همخوانی بیشتری با داده‌های ایستگاهی نسبت به سنجنده‌های دیگر دارند. بارش CMORPH دارای کم‌برآوردی نسبت به داده‌های ایستگاهی در همه‌ی ماه‌ها بوده و بیشترین انطباق آن در ماه‌های می، ژوئیه، اوت و نوامبر است. در حالی که بیشترین انطباق بارش ماهانه حاصل از سنجنده IMERG در ماه‌های ژانویه، ژوئیه، نوامبر و دسامبر بوده است.



شکل ۴. نمودار تحلیل میانگین بلندمدت بارش ماهانه (۲۰۰۷-۲۰۱۸) منطقه‌ای برای بارش ایستگاهی و بارش حاصل از سنجنده‌های مورد مطالعه

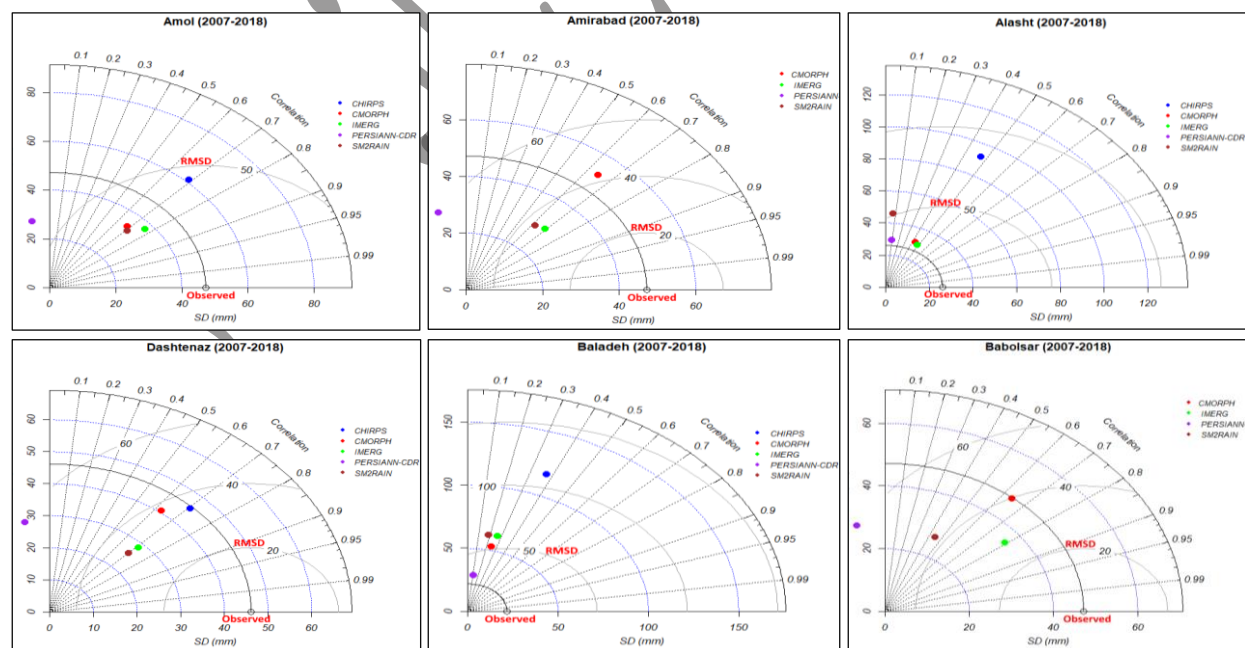
شکل ۵ توزیع بارش ماهانه را برای هر محصول بارش ماهواره‌ای در ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان بیان کرد دامنه تغییرات محصولات بارش ماهواره‌ای در اغلب ایستگاه‌ها تفاوت زیادی با بارش مشاهداتی ایستگاه‌ها دارد. در سنجنده CHIRPS، داده‌ها در اغلب ایستگاه‌ها خصوصاً در ارتفاعات پراکنده‌تر از داده‌های ایستگاه زمینی بوده و گسترش بیشتری دارند. اما در ایستگاه‌های دشت ناز، نوشهر، کیاسر و رامسر انطباق بیشتری با داده‌های ایستگاهی دارند. به‌طور کلی، سنجنده CMORPH در ایستگاه‌های بلده، امیرآباد، آلاشت، بابلسر، پل سفید، کجور و سیاه‌بیشه، سنجنده IMERG در ایستگاه‌های آمل، آلاشت، بابلسر، سیاه‌بیشه و رامسر، و سنجنده SM2RAIN در ایستگاه‌های امیرآباد، کیاسر و سیاه‌بیشه همخوانی بیشتری با مشاهدات بارش ایستگاهی دارند. با این حال، سنجنده PERSIANN-CDR در اغلب ایستگاه‌ها دارای تفاوت فاحشی با بارش ایستگاهی چه در دامنه تغییرات و چه در مقدار میانگین بارش بوده است.

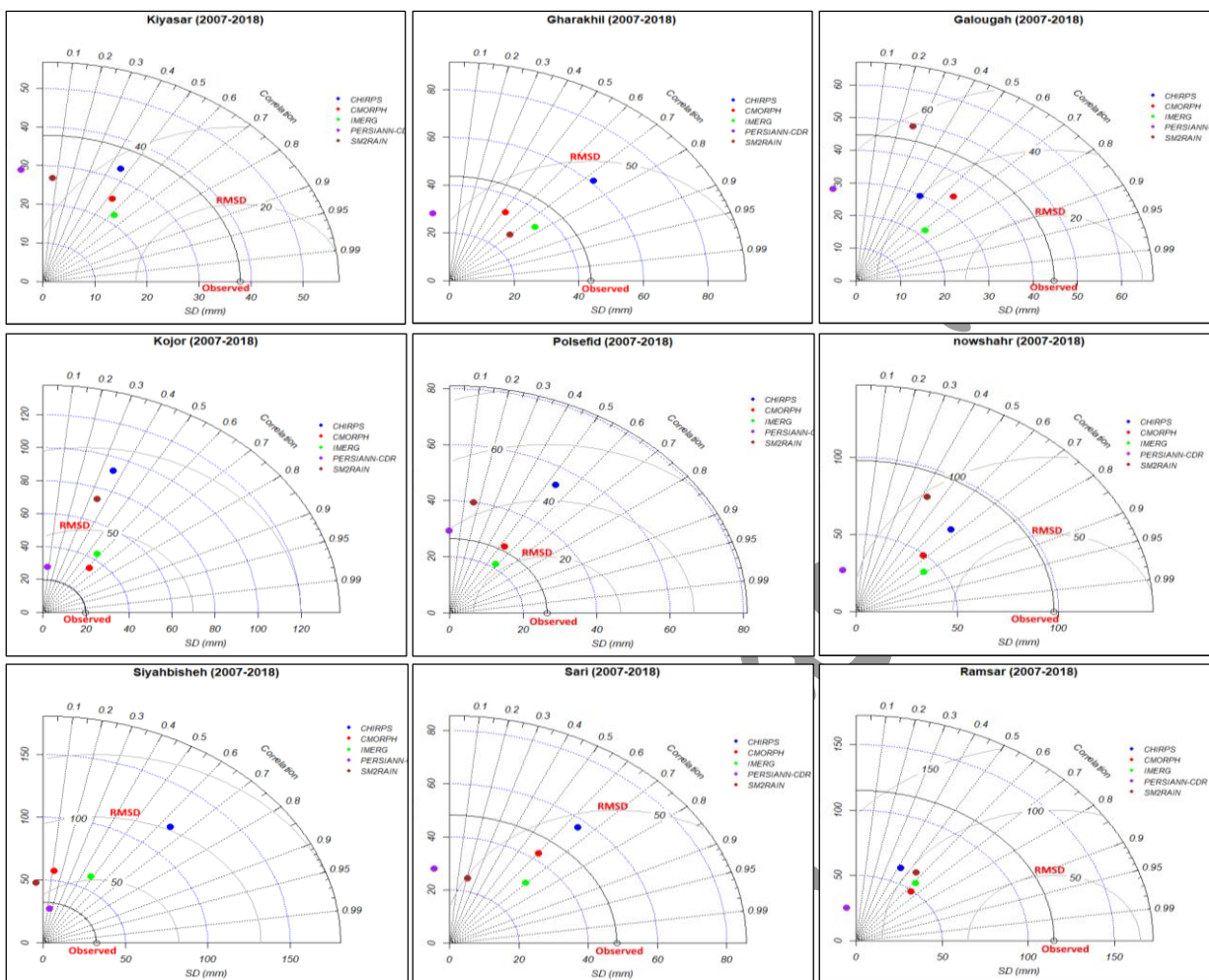




شکل ۵. نمودار جعبه‌ای حاصل از داده‌های بارش ماهانه برای ایستگاه زمینی و سنجنده‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های مختلف (محور عمودی برابر مقدار بارندگی ماهانه به میلی‌متر است)

نتایج ترسیم دیاگرام تیلور (شکل ۶) برای داده‌های بارش ماهانه ایستگاهی با بارش نزدیک‌ترین نقطه از سنجنده‌های مورد مطالعه به ایستگاه زمینی مورد نظر نشان داده است که محصولات CHIRPS، CMORPH و SM²RAIN در ایستگاه‌های واقع در نواحی ساحلی (آمل، دشت ناز، قراخیل و ...) دارای دقت بالاتری بوده (همبستگی ۰/۷) اما در ارتفاعات (ایستگاه‌های کجور، بلده، سیاه‌بیشه و ...) دارای دقت پایین‌تری (همبستگی ۰/۳۵) می‌باشند. داده‌های IMERG نیز از همین الگو پیروی می‌کنند اما دقت نسبتاً بالاتری (همبستگی ۰/۸) نسبت به ۳ سنجنده قبل دارند. در حالی که برای محصول بارش PERSIAN، دقت داده‌ها برای تمامی محصولات مورد مطالعه پایین و همبستگی آن‌ها بسیار ضعیف بوده به طوری که در نواحی ساحلی، مقدار همبستگی منفی است.





شکل ۶. ترسیم نمودار تیلور برای داده‌های بارش ماهانه در ایستگاه زمینی و سنجنده‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های مختلف (SD: انحراف معیار، RMSD: اختلاف ریشه میانگین مربعات)

ارزیابی دقت داده‌های بارش ماهانه مستخرج از محصولات ماهواره‌ای CHIRPS، CMORPH، IMERG، PERSIANN-CDR و SM²RAIN در مقابل داده‌های ایستگاهی در سطح استان مازندران با استفاده از معیارهای ارزیابی مختلف انجام گردید و نتایج برای کل ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول‌های ۴، ۵ و ۶ ارائه گردید. بررسی مقدار اریبی (BIAS) یا انحراف بین بارش برآورد شده به وسیله ماهواره یا از طریق سنجنده‌های مورد مطالعه و داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی (جدول ۴) نشان داده است که کمترین مقدار اریب در تمامی محصولات ماهواره‌ای در نواحی ساحلی (مانند ایستگاه‌های رامسر، نوشهر و گلوگاه) و بیشترین مقدار اریب در نواحی کوهستانی با ارتفاعات بالاتر (مانند بلده و کجور) برآورد گردید؛ به گونه‌ای که در نواحی ساحلی که ارتفاع از سطح دریا پایین است، مقادیر بارش برآورد شده توسط ماهواره نسبت به بارش مشاهده شده در ایستگاه زمینی، مقدار کمی (کمتر از ۱/۱ میلی‌متر) کم‌برآوردی (مقدار اریب منفی) دارد. به سمت ارتفاعات بالاتر، مقدار اریب مثبت است که بیانگر بیش‌برآوردی مقدار بارش مستخرج از سنجنده‌ها نسبت به بارش ایستگاه زمینی است. این الگو در محصولات بارش مختلف با کمی تفاوت همراه است؛ به عنوان مثال، برای محصولات CMORPH و IMERG، مقدار اریب در نیمه‌ی شرقی استان منفی برآورد شده است در حالی که برای محصولات

یا سنجنده‌های دیگر، مقدار اریب در این نواحی مثبت بوده و بیش‌برآوردی دارد. با این حال، کمترین مقدار اریب توسط سنجنده‌های PERSIAN-CDR و SM²RAIN برآورد شده است.

نتایج بررسی مقادیر ضریب همبستگی اسپیرمن (CC) بین بارش برآورد شده از سنجنده‌های مورد مطالعه و بارش مشاهداتی ایستگاه‌ها (جدول ۴) نشان داد که بارش‌های ماهواره‌ای در مناطق مختلف استان از نظر همبستگی دارای دقت‌های متفاوتی بوده است. بیشترین ضریب همبستگی در حدود ۰/۸ و کمترین آن صفر است. با این حال، همبستگی دو مجموعه داده بارش برای سنجنده‌های مختلف، مقادیر متفاوتی را در نواحی مشابه از استان نشان داده است؛ برای سنجنده‌های CMORPH، IMERG و SM²RAIN، بیشترین همبستگی (۰/۷-۰/۸) در نواحی ساحلی شرقی از استان (مانند گلوگاه و امیرآباد) برآورد شد. حال آنکه کمترین مقدار همبستگی (۰/۲-۰/۴) توسط این ۳ سنجنده در نواحی جنوب غربی (مانند بلده و سیاه‌بیشه) که دارای ارتفاع بالاتری از سطح دریا هستند، مشاهده شد. با این حال برای سنجنده CHIRPS، بیشترین مقدار همبستگی در نواحی ساحلی استان (۰/۷-۰/۸) و کمترین مقدار آن (۰/۴) در نواحی جنوبی با ارتفاع بالاتر برآورد شد. با این حال، سنجنده PERSIANN، همبستگی مثبت و منفی بسیار ضعیفی (۰/۰۵-۰/۳۲) را در بین سنجنده‌های دیگر نشان داده است که بیانگر دقت بسیار پایین بارش ماهانه مستخرج از این سنجنده نسبت به داده‌های بارش ماهانه مشاهداتی است و به طور کلی از نظر آماره ضریب همبستگی، بیشترین دقت بارش ماهانه برای مناطق مختلف استان مربوط به سنجنده‌های CHIRPS و IMERG است.

جدول ۴. نتایج مقایسه بارش ماهانه ایستگاهی و مستخرج از سنجنده ماهواره‌ای با استفاده از آماره‌های BIAS و CC در سطح استان مازندران

ردیف	ایستگاه	موقعیت ایستگاه	CHIRPS		CMORPH		IMERG		PERSIANN		SM ² RAIN	
			CC	BIAS	CC	BIAS	CC	BIAS	CC	BIAS	CC	BIAS
۱	رامسر	غربی ساحلی	۰/۶۲	-۰/۰۴۶	۰/۶۶	-۰/۳۷	۰/۶۶	-۰/۲۷	-۰/۰۶۸	-۰/۲۵	۰/۱۰۵۶	۰/۴۶
۲	نوشهر	غربی ساحلی	۰/۷۸	-۰/۰۶۶	۰/۷	-۰/۴۱	۰/۶۹	-۰/۴۱	-۰/۰۷۲	-۰/۳۲	۰/۲۳	۰/۴
۳	سیاه‌بیشه	غربی مرتفع	۰/۶	۰/۷۸	۰/۱۵	-۰/۰۵	۰/۶۳	۰/۱۸	۰/۳۷	۰/۰۴	۰/۰۵	-۰/۱۲
۴	کجور	غربی مرتفع	۰/۴۱	۰/۷	۰/۵۸	۰/۰۴۴	۰/۶۱	۰/۱۸۳	۰/۴۹	-۰/۰۲	۰/۵۶	۰/۲۱
۵	بلده	غربی مرتفع	۰/۳۵	۱/۰۷	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۵۶	۰/۰۱۵	۰/۳۶	-۰/۰۱
۶	آمل	شرقی	۰/۷۸	۰/۲۳	۰/۶۵	-۰/۱۶	۰/۶۶	-۰/۰۹۹	۰/۲۹	-۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۷
۷	بابلسر	شرقی ساحلی	-	-	۰/۶۶	-۰/۲۲	۰/۷۳	-۰/۲۱	۰/۱۶	-۰/۳۲	-۰/۰۷۴	۰/۶۸
۸	قراخیل	شرقی	۰/۷۶	۰/۱۹	۰/۵۴	-۰/۲	۰/۶۸	-۰/۱۲	۰/۲۹	-۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۶۹
۹	آلاشت	شرقی مرتفع	۰/۴۶	۰/۵۱	۰/۴۵	-۰/۰۵۵	۰/۵۵	-۰/۰۰۵	۰/۳۹	۰/۰۳	۰/۲۴	۰/۰۷
۱۰	پل سفید	شرقی مرتفع	۰/۵۵	۰/۲۳	۰/۵۸	-۰/۰۸۲	۰/۶۱	-۰/۱۱	۰/۳۶	-۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۱۷
۱۱	ساری	شرقی	۰/۷۲	۰/۱۳	۰/۶۵	-۰/۲۱	۰/۶۴	-۰/۱۹	۰/۲۵	-۰/۰۲	-۰/۲۱	۰/۳۱
۱۲	دشت ناز	شرقی	۰/۷۷	۰/۰۶	۰/۶۵	-۰/۱۷	۰/۶۷	-۰/۱۶	۰/۳	-۰/۲۶	۰/۰۳۶	۰/۷۶
۱۳	کیاسر	شرقی مرتفع	۰/۵۹	۰/۰۲۱	۰/۷۲	-۰/۱۳	۰/۷	-۰/۱۲	۰/۳۵	-۰/۱۹	۰/۰۲۱	۰/۰۴۶
۱۴	گلوگاه	شرقی	۰/۶۸	-۰/۰۶	۰/۶۵	-۰/۱۰	۰/۸	-۰/۱۳	۰/۳۲	-۰/۲۸	۰/۱۱۵	۰/۳
۱۵	امیرآباد	شرقی ساحلی	-	-	۰/۷۶	-۰/۰۲۲	۰/۷۴	-۰/۱۴	۰/۲۹	-۰/۳	۰/۰۱۶	۰/۷۳

بررسی مقدار آماره KGE بین بارش برآورد شده توسط سنجنده و بارش ایستگاهی نشان داده است که مقدار KGE برای همه محصولات در نواحی ساحلی و نیمه شرقی استان نزدیک به ۱ (مقدار بهینه) است که بیانگر دقت بالاتر بارش برآورد شده در این نواحی نسبت به نواحی دیگر است. در حالی که در مناطق جنوب غربی استان (مانند بلده و سیاه‌بیشه) که عمدتاً نواحی مرتفع محسوب می‌شوند، مقدار KGE از مقدار بهینه ۱ فاصله نسبتاً زیادی دارد. با این حال، دقیق‌ترین بارش برآورد شده از نظر مقدار KGE بهتر در سنجنده‌های CMORPH و سپس SM²RAIN مشاهده گردید.

نتایج ارزیابی آماری دقت سنجنده‌ها با استفاده از آماره RMSE (شکل ۸) نشان داده است که کمترین میزان RMSE برای همه سنجنده‌ها در نیمه شرقی استان بوده است که بیانگر دقت بالاتر بارش‌های برآورد شده مبتنی بر سنجنده در مقابل بارش مشاهداتی ایستگاه زمینی است. در حالی که نیمه غربی استان دارای RMSE کمتر و متغیر می‌باشند. به طور کلی بر اساس سنجنده CHIRPS، بیشترین RMSE (دقت پایین‌تر) در نواحی جنوب غربی (۱۵-۱۴ میلی‌متر) برآورد شد. در حالی که برای سنجنده‌های دیگر، کمترین مقدار RMSE در نواحی شرقی غیر ساحلی مشاهده شد. با این حال، نواحی ساحلی غربی (رامسر و نوشهر) دارای بیشترین مقدار RMSE (خطای بالاتر) بوده‌اند. اما این مقدار در CHIRPS برای نواحی مرتفع جنوب غربی برآورد شد. مقدار این آماره در بارش ماهانه برای سنجنده‌ها و نواحی مختلف از صفر تا ۱۴ میلی‌متر متغیر است که بیشترین مقدار خطا مربوط به سنجنده CHIRPS است.

جدول ۵. نتایج مقایسه بارش ماهانه ایستگاهی و مستخرج از سنجنده ماهواره‌ای با استفاده از آماره‌های KGE و RMSE در سطح استان مازندران

ردیف	ایستگاه	موقعیت ایستگاه	CHIRPS		CMORPH		IMERG		PERSIANN		SM*RAIN	
			RMSE	KGE	RMSE	KGE	RMSE	KGE	RMSE	KGE	RMSE	KGE
۱	رامسر	غربی ساحلی	۸/۷۸	۰/۳۷	۸/۸۳	۰/۰۰۸	۸/۳۲	۰/۱۴	۱۰/۲۸	-۰/۴۸	۸/۰۴	۰/۳۱
۲	نوشهر	غربی ساحلی	۶/۱۸	۰/۵۸	۷/۹۴	۰/۰۰۱	۷/۶	-۰/۰۲	۹/۰۴	-۰/۵۲	۸/۶۵	۰/۳۲
۳	سیاه‌بیشه	غربی مرتفع	۱۲/۷	-۱/۱۵	۵/۲۵	-۰/۰۰۲	۴/۹	-۱/۰۸	۵/۵۶	-۰/۷۹	۴/۹۶	-۰/۳۳
۴	کجور	غربی مرتفع	۱۱/۰۹	-۲/۰۸	۲/۳۱	-۰/۲۵	۳/۷۱	-۲/۵۶	۶/۵	-۴/۱	۸/۸۹	-۱۳/۵
۵	بلده	غربی مرتفع	۱۵/۷۱	-۳/۱۷	۵/۱۵	-۲/۶۹	۷/۲۲	-۶/۹	۷/۰۸	-۳/۹۳	۶/۹۱	-۶/۰۸
۶	آمل	شرقی	۴/۶۳	-۰/۲۶	۳/۵۱	۰/۱۹	۲/۷۸	۰/۴	۶/۰۸	-۰/۴۷	۴/۰۴	۰/۲۷
۷	بابلسر	شرقی ساحلی	-	-	۴/۸۲	۰/۲	۴/۱۷	۰/۱۵	۸/۱۳	-۰/۴۷	۴/۱	۰/۲۷
۸	قراخیل	شرقی	۴/۱۷	-۰/۲۱	۴/۰۴	۰/۰۷۱	۲/۷۸	-۰/۳۷	۵/۹	-۰/۴۳	۲/۸۱	۰/۵۴
۹	آلاشت	شرقی مرتفع	۹/۲۴	-۷/۸۷	۲/۶۵	۰/۴۲	۲/۴	۰/۵۳	۵/۷	-۱/۳۵	۵/۱۵	-۱/۵۲
۱۰	پل سفید	شرقی مرتفع	۴/۶۸	-۱/۶۴	۲/۴	۰/۴۶	۲/۳	۰/۲۹	۵/۵	-۱/۱۱	۴/۲۴	-۰/۶۶
۱۱	ساری	شرقی	۴/۰۴	۰/۳۳	۴/۲۲	۰/۱۹۵	۳/۶۸	۰/۱۶	۵/۸۳	-۰/۱۷	۴/۸۷	-۰/۱۲
۱۲	دشت ناز	شرقی	۳/۰۱	۰/۶۹	۳/۷۵	۰/۲۴	۳/۳۳	۰/۱۷	۶/۱	-۰/۴۹	۲/۹	۰/۵۲
۱۳	کیاسر	شرقی مرتفع	۳/۱	۰/۵۸	۳/۱۴	۰/۲۱	۲/۸۵	۰/۲	۵/۹۶	-۰/۷۳	۳/۷۵	۰/۰۱۲
۱۴	گلوگاه	شرقی	۳/۴	۰/۴۲	۳/۱۳	۰/۳۳	۳/۱۴	۰/۱۹	۶/۱۸	-۰/۶۲	۴/۹۴	۰/۰۹۵
۱۵	امیرآباد	شرقی ساحلی	-	-	۳/۷	۰/۷۴	۳/۵۶	۰/۲۱	۶/۵۴	-۰/۵۲	۳/۶۵	۰/۴۸

بر اساس آماره MAD نیز مشابه با الگوی تغییرات RMSE، کمترین مقدار این آماره (نزدیک به صفر) در نواحی شرقی است که بیانگر دقت بالاتر بارش برآورد شده توسط سنجنده‌های مورد مطالعه در نیمه شرقی استان است در حالی که به سمت نواحی غربی و مرتفع، مقدار این آماره افزایش یافته است. نتایج بر اساس آماره NSE نشان داده است که مقدار این آماره در سنجنده‌های مختلف، متفاوت است؛ به طوری که بهینه‌ترین مقدار این آماره برای سنجنده‌های CHIRPS، CMORPH، IMERG و SM*RAIN بین ۰/۵-۰/۰ در نیمه شرقی استان و نواحی ساحلی است که بیانگر دقت بالاتر بارش برآورد شده توسط سنجنده‌ها در مقایسه با داده مشاهداتی ایستگاهی از نظر این آماره است. محدوده تغییرات NSE توسط سنجنده CMORPH (۰/۵-۰/۶) در مناطق مختلف استان کمتر از سنجنده‌های دیگر است که بیانگر دقت بالاتر این سنجنده نسبت به سنجنده‌های دیگر در نواحی مختلف استان است. در حالی که سنجنده‌هایی مانند CHIRPS و SM*RAIN، مقدار NSE را برای نواحی مرتفع جنوب غربی به ترتیب تقریباً ۶۰- و ۲۷- برآورد نموده‌اند که دقت نسبتاً پایین داده‌های بارش ماهانه مستخرج از سنجنده‌ها از نظر شاخص NSE است.

جدول ۶. نتایج مقایسه بارش ماهانه ایستگاهی و مستخرج از سنجنده ماهواره‌ای با استفاده از آماره‌های NSE و MAD در سطح استان مازندران

CHIRPS	CMORPH	IMERG	PERSIANN	SM*RAIN
--------	--------	-------	----------	---------

ردیف	ایستگاه	موقعیت ایستگاه	MAD	NSE	MAD	NSE	MAD	NSE	MAD	NSE	MAD	NSE
۱	رامسر	غربی ساحلی	۰/۴۳	۰/۱۶	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۴۳	۰/۱۵
۲	نوشهر	غربی ساحلی	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۰۵۲	۰/۴۳	۰/۰۵۲	۰/۴۳	۰/۰۵۲	۰/۴۳	۰/۰۵۲
۳	سیاه‌بیشه	غربی مرتفع	۰/۸۲	-۲۱/۲۴	۰/۸۲	-۲/۸	۰/۲۸	-۲/۳۲	۰/۲۴	-۳/۲۶	۰/۴	-۲/۲۹
۴	کجور	غربی مرتفع	۰/۷۲	-۴۳/۹۵	۰/۷۲	-۰/۹۵	۰/۱۳	-۴/۰۴	۰/۲۲	-۱۴/۱۹	۰/۴۹	-۲۷/۹
۵	بلده	غربی مرتفع	۱/۱۲	-۶۲/۳۴	۱/۱۲	-۵/۷۹	۰/۳	-۱۲/۳۶	۰/۴۵	-۱۱/۸۶	۰/۵۸	-۱۱/۲۶
۶	آمل	شرقی	۰/۲۹	-۰/۳۹	۰/۲۹	۰/۲	۰/۲۱	۰/۵	۰/۱۶	-۱/۴	۰/۴۲	-۰/۰۶
۷	بابلسر	شرقی ساحلی	-	-	-	-	۰/۱۳	۰/۲۸	۰/۳۵	-۰/۲۹	۰/۴۸	۰/۳۸
۸	قراخیل	شرقی	۰/۲۵	-۰/۳۱	۰/۲۵	-۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۱۶	-۱/۶	۰/۴۱	۰/۴
۹	آلاشت	شرقی مرتفع	۰/۵۵	-۱۷/۱۸	۰/۵۵	-۰/۴۹	۰/۱۷	-۰/۲۳	۰/۱۵	-۵/۸۸	۰/۴۱	-۴/۵۵
۱۰	پل سفید	شرقی مرتفع	۰/۲۹	-۳/۴۹	۰/۲۹	-۰/۱۹	۰/۱۶	-۰/۰۸	۰/۱۴	-۵/۱۲	۰/۳۹	-۲/۶۵
۱۱	ساری	شرقی	۰/۲۴	-۰/۰۱	۰/۲۴	-۰/۱	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۲۲	-۱/۱	۰/۴	-۰/۴۶
۱۲	دشت ناز	شرقی	۰/۱۸	۰/۳۸	۰/۱۸	۰/۰۴۸	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۲	-۱/۵	۰/۴۳	۰/۴۵
۱۳	کیاسر	شرقی مرتفع	۰/۱۷	۰/۰۳۳	۰/۱۷	۰/۰۱۳	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۴	-۲/۵۶	۰/۴۲	-۰/۴
۱۴	گلوگاه	شرقی	۰/۱۸	۰/۱۶۵	۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۱۶	-۱/۷۴	۰/۴۳	-۰/۷۴
۱۵	امیرآباد	شرقی ساحلی	-	-	-	۰/۳۲	۰/۲	۰/۳۷	۰/۱۹	-۱/۱	۰/۴۶	۰/۳۵

در نهایت بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان اظهار داشت هر محصول بر اساس نوع توپوگرافی و اقلیم منطقه، نتیجه‌ای متفاوت در تخمین بارش ارائه می‌دهد و نیاز به مطالعات بیشتر با توجه به نوع رخدادها در هر منطقه و بررسی جزئی‌تر هر محصول است (Rasoulzadeh et al., ۲۰۲۲). میانگین بارش سالانه منطقه‌ای در محصولات IMERG و CMORPH به میانگین بارش سالانه مشاهداتی نزدیک‌تر بوده است. برای میانگین بارش ماهانه منطقه‌ای نیز این دو محصول در تمامی ماه‌ها انطباق بیشتری با میانگین بارش مشاهداتی ایستگاه‌ها داشتند. در حالی که محصول CHIRPS دارای انطباق مناسبی با داده‌های ایستگاهی تنها در ماه‌های گرم (می تا اکتبر) بود. محصولات مورد مطالعه در اغلب موارد برای نواحی کم ارتفاع (خصوصاً نواحی ساحلی) دارای کم‌برآوردی و در نواحی مرتفع دارای بیش‌برآوردی بوده‌اند. بهترین میزان همبستگی محصولات بارش مورد مطالعه در پهنه استان مازندران در اغلب موارد مربوط به نواحی شرقی نزدیک سواحل (تا ۰/۸) بوده است. با این حال، الگوی همبستگی در ایستگاه‌های مختلف و برای محصولات مورد مطالعه متفاوت است. اما محصولات IMERG و CMORPH دارای بیشترین ضریب همبستگی (۰/۸-۰/۶) در بین محصولات دیگر بوده است در حالی که داده‌های بارش PERSIAN-CDR از همبستگی بسیار ضعیفی (نزدیک صفر و در اغلب موارد منفی) برخوردار بوده است. این نتیجه نشان می‌دهد که داده بارش برآورد شده توسط PERSIAN-CDR رابطه بسیار کمی با مشاهدات بارش زمینی داشته و الگوی متفاوتی را دنبال می‌کند. با توجه به توپوگرافی پیچیده منطقه و پراکندگی ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش زمینی، عملکرد ضعیف محصول بارش PERSIANN-CDR قابل درک است (Khettouch et al., ۲۰۲۳). همچنین از صفر تا ۱۵ میلی‌متر خطا در ایستگاه‌های زمینی با بارش ماهانه محصولات مختلف وجود داشت که محصولات IMERG و CMORPH کمترین خطا (۲-۴ میلی‌متر) را در بارش ماهانه برای اغلب مناطق استان دارا بودند؛ به طوری که کمترین میزان خطا عمدتاً در نیمه‌ی شرقی استان وجود داشت. یکی از مشکلات CMORPH عملکرد پایین آن در تشخیص بارش برف و بارندگی فصل سرد است که کم‌برآوردی برای بارش در این فصل دارد (Xie et al., ۲۰۱۷). مقایسه نتایج معیارها و شاخص‌ها در اکثر محصولات نشان داد که تغییرات ارتفاعی در برآورد بارش تأثیرگذار است. به‌طوریکه در اغلب موارد، بارش در ایستگاه‌های مرتفع نسبت به ایستگاه‌های واقع شده در نوار ساحلی دریای خزر، با دقت پایین‌تری برآورد شده است. اختلاف بین دو مجموعه داده ماهواره‌ای و زمینی در برخی مناطق ممکن است به علت کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی باشد که موجب ایجاد خطاهای درون‌یابی بزرگ در داده‌های شبکه‌ای می‌شود. همچنین از جمله مسائلی که موجب اختلاف دو مجموعه بارش می‌شود می‌توان به منابع مختلف داده‌های بارش زمینی، تفاوت در مکان ایستگاه و

شبکه‌های توزیع بارش، تفاوت در روش ارزیابی و نیز تفاوت در مقیاس زمانی یا منطقه مورد مطالعه اشاره نمود (Lei et al., ۲۰۲۲; Yang et al., ۲۰۲۴)

به طور کلی در تشریح رفتار هر محصول بارش ماهواره‌ای به طور خلاصه می‌توان بیان نمود که محصول **CHIRPS**: دارای کم‌برآوردی در سواحل و بیش‌برآوردی در ارتفاعات است. عملکرد کلی بالاتری در نیمه‌ی شرقی استان دارد. فاصله از ایستگاه زمینی تأثیر چندانی در عملکرد بارش در بررسی ایستگاه-شبکه ندارد و عملکرد محصول بیشتر تحت تأثیر توپوگرافی است. خلاصه‌ی معیارهای آماری به گونه‌ای است که در نواحی ساحلی و کم ارتفاع، $RMSE=0.4$ mm، $NSE=(-1.0)$ ، $MAD=0.04$ ، $BIAS=-$ ، $CC=0.6$ و $KGE=(-1.0)$ اما در نواحی کوهستانی $RMSE=12.15$ ، $NSE=(-0.4)$ ، $MAD=0.8$ ، $BIAS=1$ ، $CC=0.6$ و $KGE=(-2.0)$ است. محصول **CMORPH**: دارای کم‌برآوردی در سواحل و بیش‌برآوردی در ارتفاعات است. در نواحی کم‌ارتفاع، تحت تأثیر فاصله از ایستگاه قرار دارد هرچه فاصله کمتر باشد، قطعیت بالاتر می‌شود. تحت تأثیر توپوگرافی قرار دارد. در نواحی ساحلی و کم‌ارتفاع $RMSE=0.6$ mm، $NSE=(-1.0)$ ، $MAD=0.04$ ، $BIAS=(-0.04)$ و $CC=0.6$ و $KGE=0.1$ اما در نواحی کوهستانی $RMSE=0.6$ mm (در نواحی ساحلی غرب)، $NSE=-6$ ، $MAD=0.45$ (در نواحی ساحلی غرب)، $BIAS=0.2$ ، $KGE=-3.0$ و $CC=0.4$ است. محصول **IMERG**: دارای کم‌برآوردی در نواحی ساحلی و نیمه‌ی شرقی و بیش‌برآوردی در نواحی کوهستانی و مرتفع است. فاصله از ایستگاه در نواحی کوهستانی (برای مثال ایستگاه بلده) باعث کاهش عملکرد مدل و افزایش عدم قطعیت شده است. تحت تأثیر توپوگرافی است و عملکرد محصول در نیمه‌ی شرقی استان بیشتر از نیمه‌ی غربی است. در نیمه‌ی شرقی استان $RMSE=2.4$ ، $NSE=0.05$ ، $MAD=0.14$ ، $BIAS=-0.12$ و $KGE=0.1$ اما در نیمه‌ی غربی استان $RMSE=7.9$ ، $NSE=-12$ (در ایستگاه بلده)، $MAD=0.4$ ، $BIAS=-0.2$ (نواحی ساحلی غربی دارای $BIAS$ مثبت است)، $KGE=-7$ و $CC=0.4$ است. محصول **PERSIANN-CDR**: دارای بیش‌برآوردی در اغلب نواحی (به جز نواحی ساحلی غرب) است که در نواحی کوهستانی بیشتر است. از نظر معیارهای ارزیابی مختلف دارای الگوی متفاوتی است. کمترین مقدار $RMSE$ و MAD (به ترتیب ۵-۶ میلی‌متر و ۰/۳۵-۰/۴۵ در نیمه‌ی شرقی و بیشترین آن (به ترتیب ۹-۱۰ و ۰/۵۵-۰/۶) در نواحی ساحلی غرب است. اما شاخص NSE در نیمه‌ی شمالی ساحلی کمتر (۰-۲) و در نواحی کوهستانی غربی بیشتر (۱۴-) است. با این حال، کمترین مقدار $BIAS$ در نواحی ساحلی غربی (۰-۰/۰۷-)، کم‌برآوردی و بیشترین آن در نواحی کوهستانی غربی (۰/۶-)، بیش‌برآوردی است. در حالی که KGE نیز همانند NSE در نیمه‌ی شمالی کمترین مقدار (۰-۱-) اما در نواحی کوهستانی بیشترین مقدار (۴-) را دارد. مقدار همبستگی ضعیف و منفی است. تغییرات ارتفاعی بر روی عملکرد محصول بارش تأثیر گذاشته است اما فاصله از ایستگاه چندان تأثیرگذار نیست. محصول **SM*RAIN**: در اغلب ایستگاه‌ها (به جز ساری و بابلسر) دارای بیش‌برآوردی است. عملکرد محصول بارش تحت تأثیر توپوگرافی منطقه است. عملکرد و دقت در نواحی کم‌ارتفاع (نواحی شرقی) بیشتر از نواحی کوهستانی است. فاصله از ایستگاه بر روی دقت محصول تأثیر گذاشته است (برای مثال، فاصله زیاد در ایستگاه نوشهر باعث کاهش تقریبی قطعیت و فاصله کم در ایستگاه بلده موجب کاهش عدم قطعیت شده است). نیمه‌ی شرقی استان دارای عملکرد بالاتری نسبت به نیمه‌ی غربی است. در نواحی شرقی $RMSE=2.4$ ، $NSE=0.05$ ، $MAD=0.15$ ، $BIAS=-0.02$ و $KGE=0.1$ اما در نواحی غربی $RMSE=8.9$ ، $NSE=25.27$ ، $MAD=0.5$ ، $BIAS=0.4$ ، $KGE=(-1.4)$ و $CC=(-0.12)$ است. با توجه به نتایج آماری می‌توان اظهار داشت در نیمه‌ی غربی استان که تغییرات توپوگرافی نسبت به مساحت با شدت بالاتری وجود دارد و فاصله دریا و کوه کم است، محصولات بارش ماهواره‌ای دارای عدم قطعیت بالاتری هستند (Nadi & Yousefi Kebriya, ۲۰۲۴).

مطالعات مختلفی در بخش‌های مختلف ایران انجام شده است که نتایجی مشابه با مطالعه حاضر داشته است؛ معظمی^۱ و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای نشان دادند که از میان محصولات بارش PERSIANN، TMPA و CMORPH، محصول بارش CMORPH دارای عملکرد بالاتری برای منطقه بود. محمودی بابلان^۲ و همکاران (۲۰۲۲) در ارزیابی دقت ۴ محصول بارش ماهواره‌ای TRMM و IMERG، CHIRPS، PERSIANN-CDR برای محدوده نوار ساحلی غرب دریای خزر نتیجه گرفتند که محصول IMERG دارای دقت بالاتری نسبت به محصولات دیگر بوده است و ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به ماهواره‌های TRMM و PERSIANN-CDR است. قربانیان^۳ و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای، توانایی شش محصول بارش ماهواره‌ای (CHIRPS، TMPA، GSMAP، IMERG، PERSIANN و ERA^۵) در ایران (۲۰۲۰-۲۰۰۰) در مقیاس‌های زمانی متفاوت (روزانه، ماهانه و سالانه) را با استفاده از معیارهای ارزیابی مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج بر اساس معیارهای ارزیابی نشان داد که اگرچه هیچ یک از محصولات بارش ماهواره‌ای دارای عملکرد مناسبی نبوده است، اما با در نظر گرفتن تمام تحقیقات، محصول GSMAP در برآورد بارش روزانه عملکرد نسبتاً بهتری داشت (RMSE=۳,۵ mm, CC=۰,۵۹۹) و نیز تمامی محصولات بارش در ماه‌های خشک دقت بالاتری داشتند. نتایج ارزیابی محصولات بارش ماهواره CHIRPS، TRMM، PERSIANN-CDR، GPM-IMERG در نواحی شمال و شمال غرب کشور در بین سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۵ توسط رسول‌زاده^۴ و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که در همه‌ی محصولات، مقدار خطا از نواحی جنوب غربی به سمت نواحی شرق و نوار ساحلی خزر افزایش یافته است. در ارزیابی میانگین منطقه‌ای بارش‌ها، CHIRPS و IMERG دارای نتایج نزدیک به هم بودند و با اختلاف جزئی، IMERG برتری داشت. همچنین ناصری^۵ و همکاران (۲۰۲۲) در تصحیح و ارزیابی ۸ مجموعه داده جهانی بارش ماهانه در شمال غربی ایران نتیجه گرفتند که محصول IMERG بهترین عملکرد را در برآورد تغییرات زمانی و مکانی بارش ماهانه در سراسر حوزه نشان داد. در مطالعه‌ای دیگر، دهاقانی و همکاران (۲۰۲۳) در ارزیابی عملکرد سه محصول بارش ماهواره‌ای PERSIANN، TRMM و CMORPH در ۵۲ ایستگاه سینوپتیک ایران در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان دادند که TRMM و CMORPH بارش را به ترتیب ۵۶ و ۸ درصد کمتر برآورد کردند در حالی که PERSIANN بارش را ۱۴۳ درصد بیش از حد برآورد نموده است و نیز تمامی محصولات در تشخیص دقیق وقوع بارش برای نواحی شمال شرقی و جنوب غربی دارای عملکرد مناسبی بوده است. خرمی^۶ و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد ۱۴ محصول بارش ماهواره‌ای را در ترکیه مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که از میان آن‌ها، بارش‌های برآورد شده توسط IMERG، MSWEP و TRMM عملکرد بهتری در مقیاس‌های ماهانه و سالانه داشتند. نتایج نودرپور^۷ و همکاران (۲۰۲۴) در ارزیابی دقت محصولات بارش IMERG، MSWEP، TRMM و PERSIANN-CDR در ۸۱ ایستگاه سینوپتیک ایران در سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۸ با استفاده از شاخص‌های ارزیابی CC، KGE، RMSE و BIAS نشان داد که MSWEP دارای دقت بهتری در بین تمامی محصولات بود. همچنین PERSIANN-CDR بالاترین RMSE ماهانه را دارا بود در حالی که TRMM در مناطق خشک‌تر با بارش کم تا متوسط عملکرد بهتری داشت و IMERG بارش را در تمام فصول بیش از حد برآورد نمود. بنابراین می‌توان بیان کرد اگرچه چندین مجموعه داده جهانی بارش برای مطالعه و برآورد بارندگی در هر منطقه در جهان موجود است. با این حال، به منظور کاربرد محلی یا منطقه‌ای این مجموعه داده‌ها باید خطاهای احتمالی در محصولات اصلی در نظر گرفته شده و تصحیح شود (Nasseri et al., ۲۰۲۲).

۱ . Moazami
 ۲ . Mahmoudi Babolan
 ۳ . Ghorbanian
 ۴ . Rasoulzadeh
 ۵ . Nasseri
 ۶ . Khorrami
 ۷ . Nozarpour

۴- نتیجه‌گیری

در تحلیل رویدادهای اقلیمی و هیدرولوژیکی، بارش به‌عنوان یک پارامتر اصلی مطرح است. با این حال، اندازه‌گیری بارش با تفکیک مکانی و زمانی مناسب در پیش‌بینی الگوهای آب و هوایی بسیار مهم است؛ زیرا اندازه‌گیری دقیق مقدار بارش در سطح زمین به دلیل پراکندگی شبکه‌های باران‌سنجی، توپوگرافی و تنوع مکانی و زمانی رویدادها مسئله‌ی مهمی است که می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. جدیدترین ابزارها و روش‌ها برای برآورد مقدار کمی بارش، استفاده از سامانه‌های سنسور از دور و الگوریتم‌های ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی است (Mahmoudi Babolan et al., ۲۰۲۲). بر همین اساس، در این مطالعه، دقت ۵ محصول بارش ماهواره‌ای CHIRPS، CMORPH، IMERG، PERSIANN-CDR و SM²RAIN در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه و مقیاس‌های مکانی ایستگاهی و منطقه‌ای در دوره‌ی زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۸ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که در هر ۵ محصول مورد مطالعه، دقت داده‌های ماهانه بیشتر از سالانه بود. دقت محصولات IMERG و CMORPH تقریباً مشابه با یکدیگر بود اما در اکثر شاخص‌ها، محصول PERSIANN-CDR اختلاف زیادی با محصولات دیگر داشت. مهم‌ترین چالشی که محصولات بارش ماهواره‌ای در این مطالعه با آن مواجه بود، پیچیدگی‌های توپوگرافی این منطقه و نزدیکی و هم‌جواری با دریای خزر است؛ به طوری که اختلاف ارتفاع ۵۶۰۰ متری از نواحی شمالی به سمت نواحی جنوبی وجود دارد. به همین دلیل، همه محصولات سوگیری‌هایی نسبت به توپوگرافی داشتند و در مناطقی با ارتفاع بالاتر دچار اختلال در تخمین دقیق بارش شدند. از دلایل تأثیرگذار بروز خطا در محصولات بارش ماهواره‌ای و اختلاف در برآورد بارش، می‌توان به تفاوت دقت مکانی هر محصول نیز اشاره نمود. چه بسا که بارش در یک منطقه احتمال دارد در مقیاسی کوچک‌تر از اندازه پیکسل ماهواره‌ها رخ دهد و یا بارش برآورد شده در پیکسل‌های مجاور در پیکسلی که ایستگاه در آن قرار گرفته، ثبت شود. با توجه به نتایج حاصله، محصول IMERG در تمامی شاخص‌های ارزیابی و معیار همبستگی نسبت به ۴ محصول دیگر بهتر عمل کرده است. در نهایت، جهت ارزیابی و تحلیل بارش در استان مازندران خصوصاً نیمه شرقی استان و مطالعات مرتبط با برآورد بارش، پیشنهاد می‌شود محصول IMERG در اولویت استفاده قرار گیرد. استفاده از ابزارها و روش‌های نوین مانند سامانه‌های سنسور از دور و الگوریتم‌های ترکیبی، به‌عنوان راهکاری برای برآورد بارش، نشان‌دهنده پیشرفت‌های علمی در این حوزه است. نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای، به‌ویژه برتری IMERG در معیارهای مختلف، تأکید بر کارایی این محصول دارد و این موضوع می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای محققان و تصمیم‌گیرندگان در مطالعات آب و هوایی و هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، چالش‌های توپوگرافی و تأثیر آن بر دقت اندازه‌گیری بارش، به‌ویژه در نواحی با اختلاف ارتفاع زیاد، نکته‌ای اساسی است که باید در مطالعات آینده مدنظر قرار گیرد. همچنین، اشاره به تفاوت دقت مکانی محصولات و تأثیر آن بر برآورد بارش، نشان‌دهنده نیاز به بهبود روش‌ها و ابزارهای موجود است.

۵- منابع

- Aksu, H. & Akgül, M.A., ۲۰۲۰, **Performance evaluation of CHIRPS satellite precipitation estimates over Turkey**, Theoretical and Applied Climatology, ۱۴۲, PP. ۷۱-۸۴. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03301-5>
- Ashouri, H., Hsu, K., Sorooshian, S., Braithwaite, D.K., Knapp, K.R., Cecil, L.D., Nelson, B.R. & Prat, O.P., ۲۰۱۵, **PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies**, Bulletin of the American Meteorological Society, ۹۶, PP. ۶۹-۸۳. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>
- Bai, X., Shen, W., Wu, X. & Wang, P., ۲۰۲۰, **Applicability of long-term satellite-based precipitation products for drought indices considering global warming**, Journal of Environmental Management, ۲۵۵, PP. ۱۰۹۸۴۶. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109846>

- Bararisiavashkolaei, M., Sharifi, A.R. & Karimaei Tbarestani, M., ۲۰۲۱, **Analysis of the Efficiency of Remote Sensing Data for Estimation of Water Balance Components (Case Study: Tajan Catchment, Mazandaran Province)**, JGST, ۱۱(۱), PP. ۱۶۱-۱۷۰. <http://jgst.issgeac.ir/article-۱-۱۰۲۷-fa.html>
- Biswal, T., ۲۰۲۲, **Climate change and its impact on soil fertility and life forms**, In Research Anthology on Environmental and Societal Impacts of Climate Change, PP. ۱۲۲۹-۱۲۰۰.
- Boluwade, A., Stadnyk, T., Fortin, V. & Roy, G., ۲۰۱۷, **Assimilation of precipitation estimates from the integrated multisatellite retrievals for GPM (IMERG, early run) in the Canadian Precipitation Analysis (CaPA)**, Journal of Hydrology: Regional Studies, ۱۴, PP. ۱۰-۲۲. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.ejrh.۲۰۱۷.۱۰.۰۰۵>
- Brocca, L., Filippucci, P., Hahn, S., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., Schüller, L., Bojkov, B. & Wagner, W., ۲۰۱۹, **SM²RAIN-ASCAT (۲۰۰۷-۲۰۱۸): Global daily satellite rainfall data from ASCAT soil moisture observations**, Earth System Science Data, ۱۱, PP. ۱۰۸۳-۱۶۰۱. <https://doi.org/۱۰.۵۱۹۴/essd-۱۱-۱۰۸۳-۲۰۱۹>
- Chen, H. & Wen, D., ۲۰۲۳, **Dependency of errors for four global reanalysis and satellite precipitation estimates on four crucial factors**, Atmospheric Research, ۲۹۶, PP. ۱۰۷۰۷۶. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.atmosres.۲۰۲۳.۱۰۷۰۷۶>
- Dehaghani, A.M., Gohari, A., Zareian, M.J. & Haghighi, A.T., ۲۰۲۳, **A comprehensive evaluation of the satellite precipitation products across Iran**, Journal of Hydrology: Regional Studies, ۴۶, PP. ۱۰۱۳۶۰. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.ejrh.۲۰۲۳.۱۰۱۳۶۰>
- Dhungana, S., Shrestha, S., Van, T.P., Kc, S., Das Gupta, A. & Nguyen, T.P.L., ۲۰۲۳, **Evaluation of gridded precipitation products in the selected sub-basins of Lower Mekong River Basin**, Theoretical and Applied Climatology, ۱۵۱(۱), PP. ۲۹۳-۳۱۰. <https://doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۷۰۴۰۲۲۰۰۴۲۶۸۰۱>
- Dollan, I.J., Maina, F.Z., Kumar, S.V., Nikolopoulos, E.I. & Maggioni, V., ۲۰۲۴, **An assessment of gridded precipitation products over High Mountain Asia**, Journal of Hydrology: Regional Studies, ۵۲, PP. ۱۰۱۶۷۰. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.ejrh.۲۰۲۴.۱۰۱۶۷۰>
- Du, Y., Wang, D., Zhu, J., Lin, Z. & Zhong, Y., ۲۰۲۲, **Intercomparison of multiple high-resolution precipitation products over China: Climatology and extremes**, Atmospheric Research, ۲۷۸, PP. ۱۰۶۳۴۲. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.atmosres.۲۰۲۲.۱۰۶۳۴۲>
- Et-Takaouy, C., Aqnouy, M., Boukholla, A. & Stitou El Messari, J.E., ۲۰۲۴, **Exploring the spatiotemporal variability of four satellite-based precipitation products (SPPs) in northern Morocco: a comparative study of complex climatic and topographic conditions**, Mediterranean Geoscience Reviews, PP. ۱-۲۲. <https://doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۴۲۹۹۰۰۰۲۴۰۰۱۱۹۰۵>
- Farsadnia, F., Rostami Kamrod, M. & Moghadam Nia, A., ۲۰۱۲, **Rainfall Trend Analysis of Mazandaran Province Using Regional Mann-Kendall Test**, Iran-Water Resources Research, ۸(۲), PP. ۶۰-۷۰.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. & et al., ۲۰۱۵, **The climate hazards infrared precipitation with stations-A new environmental record for monitoring extremes**, Scientific Data, ۲, PP. ۱۵۰۰۶۶. <https://doi.org/۱۰.۱۰۳۸/sdata.۲۰۱۵.۶۶>
- Ghorbanian, A., Mohammadzadeh, A., Jamali, S. & Duan, Z., ۲۰۲۲, **Performance evaluation of six gridded precipitation products throughout Iran using ground observations over the last two decades (۲۰۰۰-۲۰۲۰)**, Remote Sensing, ۱۴(۱۵), PP. ۳۷۸۳. <https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/rs۱۴۱۵۳۷۸۳>
- Gu, L., Yin, J., Wang, S., Chen, J., Qin, H., Yan, X., & Zhao, T., ۲۰۲۳, **How well do the multi-satellite and atmospheric reanalysis products perform in hydrological modelling**, Journal of Hydrology, ۶۱۷, PP. ۱۲۸۹۲۰. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.jhydrol.۲۰۲۲.۱۲۸۹۲۰>
- Guo, B., Xu, T., Yang, Q., Zhang, J., Dai, Z., Deng, Y. & Zou, J., ۲۰۲۳, **Multiple spatial and temporal scales evaluation of eight satellite precipitation products in a mountainous catchment of south China**, Remote Sensing, ۱۵(۵), PP. ۱۲۷۳. <https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/rs۱۵۰۵۱۲۷۳>
- Gyasi-Agyei, Y., ۲۰۲۰, **Identification of the optimum rain gauge network density for hydrological modelling based on radar rainfall analysis**, Water, ۱۲(۷), PP. ۱۹۰۶. <https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/w۱۲۰۷۱۹۰۶>
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P. & Yoo, S., ۲۰۱۵, **NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG)**, In Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version ۴,۵; ۲۰۱۵. Available online: https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V۴,۵.pdf (accessed on ۱ December ۲۰۲۱).

- Hussein, A.A. & Baylar, A., ۲۰۲۳, **Hydrological Model Evaluation of Ground, GPM IMERG, and CHIRPS precipitation data for Shabelle Basin in Ethiopia**, Journal of Electronics, Computer Networking and Applied Mathematics (JECNAM), ۳(۰۱), PP. ۴۱-۶۰. <https://doi.org/۱۰,۵۵۵۲۹/jecnam.۳۱,۴۱,۶۰>
- Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A. & Xie, P., ۲۰۰۴, **CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution**, Journal of Hydrometeorology, ۲۰۰۴(۵), PP. ۴۸۷-۵۰۳. [https://doi.org/۱۰,۱۱۷۵/۱۵۲۵-۷۵۴۱\(۲۰۰۴\)۰۰۵%۳C۰۴۸۷:CAMTPG%۳E۲,۰۰.CO;۲](https://doi.org/۱۰,۱۱۷۵/۱۵۲۵-۷۵۴۱(۲۰۰۴)۰۰۵%۳C۰۴۸۷:CAMTPG%۳E۲,۰۰.CO;۲)
- Joyce, R.J. & Xie, P., ۲۰۱۱, **Kalman filter-based CMORPH**, Journal of Hydrometeorology, ۱۲, PP. ۱۵۴۷-۱۵۶۳. <https://doi.org/۱۰,۱۱۷۵/JHM-D-۱۱-۰۲۲,۱>
- Keikhosravi-Kiany, M.S., Masoodian, S.A. & Balling Jr, R.C., ۲۰۲۳, **Reliability of satellite-based precipitation products in capturing extreme precipitation indices over Iran**, Advances in Space Research, ۷۱(۳), PP. ۱۴۵۱-۱۴۷۲. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۱۶/j.asr.۲۰۲۲,۱۰,۰۰۳>
- Khettouch, A., Hssaisoune, M., Hermans, T. & et al., ۲۰۲۳, **Ground validation of satellite-based precipitation estimates over poorly gauged catchment: the case of the Dr^aa basin in Central-East Morocco**, Mediterranean Geoscience Reviews, ۵(۳), PP. ۱۵۹-۱۷۵. <https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۴۲۹۹۰-۰۲۳-۰۰۱۰۸-۰>
- Khorrami, B., Sahin, O.G. & Gunduz, O., ۲۰۲۴, **Comprehensive comparison of different gridded precipitation products over geographic regions of Türkiye**, Journal of Applied Remote Sensing, ۱۸(۳), PP. ۰۳۴۵۰۳-۰۳۴۵۰۳. <https://doi.org/۱۰,۱۱۱۷/۱.JRS.۱۸,۰۳۴۵۰۳>
- Kunkel, K.E., Robinson, D.A., Champion, S., Yin, X., Estilow, T. & Frankson, R.M., ۲۰۱۱, **Trends and extremes in Northern Hemisphere snow characteristics**, Current Climate Change Reports, ۲, PP. ۶۵-۷۳. <https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۴۱۶۴۱-۰۱۶-۰۰۳۶-۸>
- Lai, Y., Tian, J., Kang, W., Gao, C., Hong, W. & He, C., ۲۰۲۲, **Rainfall estimation from surface soil moisture using SM²RAIN in cold mountainous areas**, Journal of Hydrology, ۶۰۶, PP. ۱۲۷۴۳۰. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۱۶/j.jhydrol.۲۰۲۲,۱۲۷۴۳۰>
- Lamontagne, J.R., Barber, C.A. & Vogel, R.M., ۲۰۲۰, **Improved Estimators of Model Performance Efficiency for Skewed Hydrologic Data**, Water Resources Research, ۵۶, PP. e۲۰۲۰WR۰۲۷۱۰۱. <https://doi.org/۱۰,۱۰۲۹/۲۰۲۰WR۰۲۷۱۰۱>
- Lei, H.J. and et al., ۲۰۲۲a, **Ground validation and error decomposition for six state-of-the-art satellite precipitation products over mainland China**, Atmospheric Research, ۲۶۹, PP. ۱۰۶۰۱۷. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۱۶/j.atmosres.۲۰۲۲,۱۰۶۰۱۷>
- Li, Y., Pang, B., Zheng, Z., Chen, H., Peng, D., Zhu, Z. & Zuo, D., ۲۰۲۳, **Evaluation of Four Satellite Precipitation Products over Mainland China Using Spatial Correlation Analysis**, Remote Sensing, ۱۵(۷), PP. ۱۸۲۳. <https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/rs۱۵۰۷۱۸۲۳>
- Maggioni, V., Sapiano, M.R. & Adler, R.F., ۲۰۱۶, **Estimating uncertainties in high-resolution satellite precipitation products: systematic or random error?**, Journal of Hydrometeorology, ۱۷(۴), PP. ۱۱۱۹-۱۱۲۹. <https://doi.org/۱۰,۱۱۷۵/JHM-D-۱۵-۰۰۹۴,۱>
- Mahmoudi Babolan, S., Nastarani Amoghini, S. & Rasoulzadeh, A., ۲۰۲۲, **Evaluation of satellite precipitation products for estimating heavy precipitation on the Caspian coast**, Water and Soil Management and Modelling, ۲(۴), PP. ۱۰۷-۱۲۲. <https://doi.org/۱۰,۲۲۰۹۸/mmws.۲۰۲۲,۱۱۱۴۷,۱۱۰۲>
- Meng, C., Mo, X., Liu, S. & Hu, S., ۲۰۲۳, **Improving near-real-time satellite precipitation products through multistage modified schemes**, Atmospheric Research, ۲۹۲, PP. ۱۰۶۸۷۵. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۱۶/j.atmosres.۲۰۲۳,۱۰۶۸۷۵>
- Mishra, R.K., ۲۰۲۳, **Fresh water availability and its global challenge**, British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies, ۴(۳), PP. ۱-۷۸. <https://doi.org/۱۰,۳۷۷۴۵/bjmas.۲۰۲۲,۰۲۰۸>
- Moazami, S., Abdollahipour, A., Zakeri Niri, M. & Ashrafi, S.M., ۲۰۱۶, **Hydrological assessment of daily satellite precipitation products over a basin in Iran**, Journal of Hydraulic Structures, ۲(۲), PP. ۳۵-۴۵. <https://doi.org/۱۰,۲۲۰۵۵/jhs.۲۰۱۶,۱۲۸۵۰>
- Nadi, M. & Yousefi Kebriya, A., ۲۰۲۴, **A Method for Correction of Tropical Rainfall Measuring Mission Satellite Temperature Network in Mazandaran Province**, Iranica Journal of Energy & Environment, ۱۵(۱), PP. ۱۰۰-۱۱۰. <https://doi.org/۱۰,۵۸۲۹/ijee.۲۰۲۴,۱۵,۰۱,۱۰>

- Nasseri, M., Schoups, G. & Taheri, M., ۲۰۲۲, **A spatiotemporal framework to calibrate high-resolution global monthly precipitation products: An application to the Urmia Lake Watershed in Iran**, International Journal of Climatology, (۴), PP. ۲۱۶۹-۲۱۹۴. <https://doi.org/10.1002/joc.۷۳۵۸>
- Nguyen, P., Ombadi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Braithwaite, D., Ashouri, H. & Thorstensen, A.R., ۲۰۱۸, **The PERSIANN family of global satellite precipitation data: A review and evaluation of products**, Hydrology and Earth System Sciences, ۲۲, PP. ۵۸۰۱-۵۸۱۶. <https://doi.org/10.5194/hess-۲۲-۵۸۰۱-۲۰۱۸>
- Nicholson, S.E. & Klotter, D.A., ۲۰۲۱, **Assessing the Reliability of Satellite and Reanalysis Estimates of Rainfall in Equatorial Africa**, Remote Sensing, ۱۳, PP. ۳۶۰۹. <https://doi.org/10.3390/rs13183609>
- Nozarpour, N., Mahjoobi, E. & Golian, S., ۲۰۲۴, **Assessment of Satellite-based Precipitation Products in Monthly, Seasonal, and Annual Time-Scale over Iran**, International Journal of Environmental Research, ۱۸(۵), PP. ۷۶. <https://doi.org/10.1007/s۴۱۷۴۲-۰۲۴-۰۰۶۱۹-۰>
- Rasoulzadeh, A., Mahmoudi Babolan, S. & Nastarani Amoghini, S., ۲۰۲۲, **Spatio-temporal Evaluation of Satellite Precipitation Products in Northwestern Iran**, Iranian Journal of Soil and Water Research, ۵۳(۹), PP. ۲۱۴۱-۲۱۶۰. <https://doi.org/10.۲۲۰۵۹/ijswr.۲۰۲۲.۳۴۵۳۹۲.۶۶۹۳۱۱>
- Rostamzadeh, H., Rasouli, A.A., Vazifeh Doost, M. & Maleki, N., ۲۰۲۰, **Comparative comparisons of precipitation obtained from TRMM, GPM and Doppler radars with ground station data (Case Study of Surface Wave from October ۲۶ to ۲۸, ۲۰۱۵ in Western Iran)**, Journal of Climate Research, ۱۳۹۸(۳۸), PP. ۴۹-۶۱.
- Savina, M., Schappi, B., Molnar, P., Burlando, P. & Sevruck, B., ۲۰۱۲, **Comparison of a Tipping-Bucket and Electronic Weighing Precipitation Gage for Snowfall**, Atmospheric Research, ۱۰۳, PP. ۴۵-۵۱. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.۲۰۱۱.۰۶.۰۱۰>
- Shabankareh, R.N.T., Ziaee, P. & Abedini, M.J., ۲۰۲۴, **Evaluation of IMERG precipitation product over various temporal scales in a semi-arid region of southern Iran**, Journal of Arid Environments, ۲۲۰, PP. ۱۰۵۱۰۲. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.۲۰۲۳.۱۰۵۱۰۲>
- Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D., Petersen, W., Huffman, G., Kidd, C., Stocker, E. & Kakar, R., ۲۰۱۸, **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, ۱۴۴, PP. ۲۷-۴۸. <https://doi.org/10.1002/qj.۳۳۱۳>
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S. & Hsu, K.L., ۲۰۱۸, **A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons**, Reviews of Geophysics, ۵۶, PP. ۷۹-۱۰۷. <https://doi.org/10.1002/۲۰۱۷RG۰۰۰۵۷۴>
- Vijay, P. & Singh, P.D.D.S., ۲۰۱۷, **Handbook of Applied Hydrology**, ۲nd ed.; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1۰۸۰/۰۲۶۲۶۶۶۵۰۹۴۹۳۳۷۶>
- Xie, P., Joyce, R., Wu, S., Yoo, S.H., Yarosh, Y., Sun, F. & Lin, R., ۲۰۱۷, **Reprocessed, bias-corrected CMORPH global high-resolution precipitation estimates from ۱۹۹۸**, Journal of Hydrometeorology, ۱۸(۶), PP. ۱۶۱۷-۱۶۴۱. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-۱۶-۰۱۶۸.۱>
- Xie, Y., Sun, W., Ren, M., Chen, S., Huang, Z. & Pan, X., ۲۰۲۲, **Stacked Ensemble Learning Models for Daily Runoff Prediction Using ۱d and ۲d Cnn**, <https://dx.doi.org/10.۲۱۳۹/ssrn.۴۲۱۱۳۵>.
- Yang, L., Shi, Z., Liu, R. & Xing, M., ۲۰۲۴, **Evaluating the performance of global precipitation products for precipitation and extreme precipitation in arid and semiarid China**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, ۱۳۰, PP. ۱۰۳۸۸۸. <https://doi.org/10.1016/j.jag.۲۰۲۴.۱۰۳۸۸۸>
- Yang, Y., Ji, W., Niu, L., Zheng, Z., Huang, W., Zhang, C., & Li, H., ۲۰۲۴, **Assessing satellite and reanalysis-based precipitation products in cold and arid mountainous regions**, Journal of Hydrology: Regional Studies, ۵۱, PP. ۱۰۱۶۱۲. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.۲۰۲۳.۱۰۱۶۱۲>