

Original Article

Iranian Remote Sensing GIS
Journal of

Comparative Analysis of the Accuracy of Satellite Precipitation Products in Mazandaran Province: Quantitative and Qualitative Evaluation with Emphasis on Station Data

Sedigheh Bararkhanpour Ahmadi¹, Reza Norooz Valashedi^{1*}, Mehdi Nadi¹, Khalil Ghorbani², Karim Solaimani³

Affiliation

1. Dep. of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
2. Dep. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
3. Dep. of Watershed Science and Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

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 15 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 0.8-0.7) at stations located in coastal areas and relatively low accuracy at high altitudes (correlation 0.35). 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=0.7-0.8 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=0.05). The RMSE values are mainly between 2 and 15 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=0-1), which was better for the CMORPH product. However, the BIAS values for all products varied between (-0.4)-1 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 or higher distance between the station and the grid has reduced or 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.

Citation:

Bararkhanpour Ahmadi, S., Norooz Valashedi, R., Nadi, M., Ghorbani, Kh., Solaimani, K., Comparative Analysis of the Accuracy of Satellite Precipitation Products in Mazandaran Province: Quantitative and Qualitative Evaluation with Emphasis on Station Data, Iran J Remote Sens GIS, 18(1): 97-120.

* Corresponding Author: r.norooz@sanru.ac.ir
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2025.237418.1236>

Received: 2024.11.01

Accepted: 2025.03.31





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^۲

سمت

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
۳. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

چکیده

سابقه و هدف: برآورد الگوهای مکانی-زمانی بارش در استان مازندران، به دلیل عوامل متعددی از جمله فقدان مشاهدات زمینی، مناطق متنوع آب‌وهوایی و شیب‌های شدید کوه‌نگاری، مشکل است. محصولات بارش ماهواره‌ای می‌توانند راه‌حلی مناسب برای اندازه‌گیری میزان بارش، به‌ویژه در نواحی دارای ایستگاه‌های زمینی پراکنده، فراهم کنند و رویکردی جدید برای مشاهده بارش در سطح جهانی، با سنجش از دور، به دست دهند. با این حال، به‌رغم استفاده گسترده این محصولات در زمینه‌های مطالعاتی گوناگون، ارزیابی کمی این محصولات به دلیل خطای ذاتی و عدم قطعیت آن‌ها، چالشی اساسی است که قبل از استفاده مستقیم از آن‌ها باید در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت مورد توجه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها: در گام نخست، محصولات بارش شبکه‌های PERSIANN-CDR، SM2RAIN، CMORPH، CHIRPS و IMERG از پایگاه داده هر یک از محصولات، با فرمت NetCDF در سطح جهانی استخراج شد. سپس داده‌های بارش هر محصول برای شبکه‌های واقع در پهنه استان مازندران، با کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی R و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، انتخاب شد. در گام بعدی، این محصولات در مقابل پانزده ایستگاه هم‌دید در سطح استان مازندران، در مقیاس‌های مکانی ایستگاه-شبکه و منطقه‌ای و مقیاس‌های زمانی ماهیانه و سالیانه ارزیابی و مقایسه شدند. این کار 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 نش‌ساتکلیف (NSE) و همچنین رسم نمودارهای آماری (تیلور و ...) انجام شد. به منظور ارزیابی شبکه به ایستگاه، داده‌های نزدیک‌ترین شبکه به هر ایستگاه هم‌دید برای هر محصول بارش، استخراج و با داده‌های بارش آن ایستگاه در مقیاس‌های زمانی متفاوت، مقایسه شد.

نتایج و بحث: نتایج بررسی منطقه‌ای محصولات بارش ماهواره‌ای، در مقیاس ماهیانه و سالیانه، بیانگر انطباق بیشتر محصولات IMERG و CMORPH بوده است؛ در حالی که محصول CHIRPS فقط در ماه‌های خشک سال عملکرد مناسبی داشت. با این حال دقت محصولات در مقیاس ماهیانه بیشتر از سالیانه بود. نتایج دیاگرام تیلور گویای دقت نسبتاً بالای محصولات IMERG، CHIRPS و CMORPH (همبستگی ۰/۷-۰/۸) در ایستگاه‌های واقع در نواحی ساحلی و دقت نسبتاً پایین در ارتفاعات (همبستگی ۰/۳۵) بوده است. در عین حال برای محصول بارش PERSIANN-CDR، داده‌ها در مورد تمامی مناطق، اندک بود و در نواحی ساحلی، مقدار همبستگی منفی داشت. با وجود این، نتایج ارزیابی محصولات بارش در سطح ایستگاه‌ها بیانگر عملکرد بهتر محصول IMERG و سپس CMORPH (CC=0.7-) و 0.8 و RMSE=2.4 mm در برآورد بارش ماهیانه، عمدتاً در نیمه شرقی استان بود. کمترین دقت و ضعیف‌ترین عملکرد را نیز محصول PERSIANN-CDR داشته است. بیشترین مقدار CC محصولات بارش برابر ۰/۸ و اغلب در نواحی شرقی و ساحلی استان بود اما کمترین آن به محصول PERSIANN-CDR (CC=0.05) تعلق داشت. مقادیر RMSE معمولاً بین ۲ تا ۱۵ میلی‌متر، به ترتیب، در نواحی کوهستانی و نیمه‌شرقی استان متغیر بود که کمترین آن به محصول IMERG و CMORPH تعلق داشت. مقادیر KGE و NSE نیز بیشتر در نواحی ساحلی و شرقی به مقدار بهینه نزدیک‌تر بوده است (NSE=0.5 و KGE=0-1) که در مورد محصول CMORPH بهتر بود. با این حال مقادیر بایاس (BIAS)، در مورد همه محصولات، بین ۰/۴- تا ۱ میلی‌متر متغیر و در نواحی ساحلی و کم‌ارتفاع، دارای کم‌برآوردی بود اما در نواحی مرتفع، بیش‌برآوردی داشت. بررسی تأثیر فاصله ایستگاه هم‌دید و بارش شبکه‌ای در دقت محصول بارش نیز نشان داده است که برای محصولات CMORPH، IMERG (در نواحی مرتفع) و SM2RAIN، فاصله کم یا زیاد بین ایستگاه و شبکه باعث کاهش یا افزایش عدم قطعیت شده است. با این حال، در مورد اغلب محصولات بارش، افزایش شایان ملاحظه ارتفاع موجب افزایش عدم قطعیت در برآورد بارش ماهواره‌ای شده است.

استناد:

برارخانپور احمدی، ص.، نوروز ولاشدی، ر.، نادى، م.، قربانی، خ.، سلیمانی، ک.، تحلیل تطبیقی دقت محصولات بارش ماهواره‌ای در استان مازندران: ارزیابی کمی و کیفی با تأکید بر داده‌های ایستگاهی، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵: ۹۷-۱۲۰.

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 به‌منزله راهکاری برای برآورد بارش، نشان‌دهنده پیشرفت‌های علمی در این حوزه است و می‌تواند راهنمای تصمیم‌گیرندگان در مطالعات آب‌وهوایی و هیدرولوژیکی باشد.

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



۱- مقدمه

بارش یکی از پارامترهای اصلی چرخه آب در کره زمین و از منابع ضروری آب برای حفظ زندگی انسان و اکوسیستم‌های زمین به شمار می‌رود (Mishra, 2023). اطلاعات بارندگی در جنبه‌های زندگی انسان، مانند مزارع کشاورزی، آبیاری، ذخایر آب، کاهش حاصلخیزی خاک، ضرورت دارد (Biswal, 2022)؛ علاوه بر این برای پیش‌بینی بلایای آب‌وهواشناسی، مانند سیل، رانش زمین، خشک‌سالی، 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 به‌منظور مقابله با تغییرات آب‌وهوایی 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 زمین‌اند (Sun et al., 2018). مشاهدات بارندگی زمینی که مستقیماً 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, 2020) که موجب می‌شود این مناطق بدون 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، به‌ویژه در مناطق کوهستانی صعب‌العبور و دور از دسترس و مناطقی که تنوع مکانی در آن‌ها چشمگیر است، میزان بارندگی منطقه‌ای اغلب دقتی پایین دارد (Savina et al., 2012)؛ در صورتی که مدل‌های هیدرولوژیکی و مدل‌سازی هیدرولوژیکی به داده‌های بارش پیوسته و دارای وضوح مکانی و زمانی بالا نیاز دارند و این مسئله به معضلی جدی تبدیل شده است.

برای دستیابی به داده‌های بارندگی، می‌توان از مشاهدات مبتنی بر سنجش از دور نیز بهره برد. تکنیک‌های سنجش از دور می‌تواند راه‌حلی برای اندازه‌گیری میزان بارندگی باشد. محصولات بارش ماهواره‌ای^۱ و راداری رویکرد جدیدی، برای مشاهده بارش در سطح جهانی با سنجش از دور، مطرح می‌کند. این محصولات، در مدل‌سازی هیدرولوژیکی روی سطح زمین، نقشی اساسی دارند و در پژوهش‌های گوناگونی استفاده شده‌اند (Gu et al., 2023; Hussein & Baylar, 2023) و در مطالعات تغییرات آب‌وهوایی هم کاربرد گسترده‌ای دارند (Bai et al., 2020; Keikhosravi-Kiany et al., 2023). نمونه‌هایی از محصولات بارش ماهواره‌ای عبارت است از محصولات CHIRPS، CPC، CMORPH، SM2RAIN، IMERG، MSWEP و PERSIAN که در مطالعات گوناگونی به کار رفته و تحلیل شده‌اند (Dehaghani et al., 2023; Khorrami et al., 2024)؛ این محصولات پوشش جهانی یا تقریباً جهانی ارائه می‌دهند اما چالش‌هایی، از جمله سوگیری‌های شناخته‌شده و داده‌های ازدست‌رفته در زمینه توپوگرافی، فصل، شدت بارش و مدار ماهواره دارند (Maggioni et al., 2016). پوشش مکانی و زمانی بالا باعث می‌شود که محصولات بارش ماهواره‌ای، در مناطق دورافتاده و کوهستانی دارای تراکم پایین باران‌سنج، ارزش ویژه‌ای داشته باشند (Boluwade et al., 2017). 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 گوناگون ایران شده و خسارت‌های مالی زیادی را به همراه داشته است. از این رو دستیابی به اطلاعات دقیق درباره بارش‌های شدید، به‌منظور بررسی و تحلیل وقایع حادی هیدرولوژیکی، ضروری است و داده‌های دقیق و مورد اعتماد بارش، برای مطالعه تغییرپذیری بارندگی،

1. Satellite Precipitation Products

پژوهشگران چندین داده بارش ماهواره‌ای را ارزیابی یا اعتبارسنجی کرده‌اند. رستم‌زاده^۲ و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از شاخص‌های ارزیابی، شامل ضریب تبیین و ضریب همبستگی، داده‌های بارش ماهواره‌های GPM و TRMM را با داده‌های بارش زمینی در غرب ایران مقایسه کردند. نتایج بیانگر اهمیت روابط بین داده‌های بارش ده ایستگاه در منطقه و ماهواره‌های GPM، TRMM بوده است. نتایج پژوهش سیاوشکلایی^۳ و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی دقت داده‌های سنجش از دور به‌منظور 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 در حوضه‌های وسیع و بدون ایستگاه زمینی، نتیجه‌مند است. گوئو^۴ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های روزانه بارندگی بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۰، در حوضه رودخانه سین‌کیانگ^۵ (حوضه آبریز کوهستانی با آب‌وهوای مرطوب نیمه‌گرمسیری موسمی) واقع در جنوب چین، دقت هشت محصول بارش ماهواره‌ای متفاوت (CHIRPS، CMORPH، GPCP، GPM، GSMaP، MSWEP، PERSIAN و SM2RAIN) را ارزیابی کردند. این ارزیابی در مقیاس مکانی (مقیاس‌های شبکه-ایستگاه و حوضه) و زمانی (مقیاس‌های سالیانه و فصلی) انجام شد. نتایج، براساس معیارهای آماری کلی، نشان داد که محصولات GSMaP و MSWEP دو محصول بارش ماهواره‌ای‌اند که با بهترین عملکرد، رتبه‌بندی می‌شوند و محصولات CHIRPS و SM2RAIN نیز نامطلوب‌ترین عملکرد یا کمترین دقت را داشتند. لی^۶ و همکاران (۲۰۲۳) چهار محصول بارش ماهواره‌ای، شامل MSWEP، GSMaP-NRT، GSMaP-Gauge و IMERG را در برابر مشاهدات روزانه بارندگی ۲۳۴۴ ایستگاه در

اهمیت دارند (Du et al., 2022)؛ بنابراین استفاده از داده‌های سنجش از دور و ماهواره که هم‌زمان بخش وسیعی را پوشش می‌دهند، اجتناب‌ناپذیر است و داده‌های بارش را می‌توان، علاوه بر ایستگاه‌های زمینی، از منابع متفاوتی مانند ماهواره‌ها و محصولات تحلیل مجدد، جمع‌آوری کرد. باین‌حال هر منبع مزایا و معایب خاص خود را دارد؛ از جمله عدم قطعیت و دقت این روش‌ها مسئله‌ای است که باید بررسی شود.

در دهه‌ی اخیر، بسیاری از محصولات سنجش از دور بارش ماهواره‌ای منتشر شده‌اند که راه جدیدی برای جمع‌آوری مشاهدات بارش جهانی یا منطقه‌ای و دستیابی به آن‌ها در اختیار قرار می‌دهند. محصولات بارش ماهواره‌ای منبع اطلاعاتی مهمی درباره بارش شمرده می‌شوند که وضوح زمانی و مکانی بالا و نیز توانمندی چشمگیری در 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 به‌منزله مکمل و جایگزین برای مشاهدات بارش ایستگاهی، کاربردی روزافزون دارند (Chen & Wen, 2023). تحلیل بارش ماهواره‌ای موجب می‌شود پژوهشگران به درک درستی درباره الگو و روند بارش جهانی و منطقه‌ای دست یابند (Kunkel et al., 2016) و داده‌های بارش ماهواره‌ای، در زمان واقعی، امکان شناسایی سریع و هشدار سیل را فراهم می‌کنند (Meng et al., 2023)؛ باین‌حال، به‌منزله روشی غیرمستقیم برای اندازه‌گیری بارش، دقت‌های متفاوتی دارند. ازسویی، مطالعات هیدرولوژیکی و هواشناسی اطلاعات دقیق، پیوسته، بلندمدت، مورد اعتماد و توزیع یکنواخت بارش را می‌طلبند. با توجه به باران‌سنج‌های کم‌تراکم با داده‌های ناقص در کشورهای درحال توسعه، بسیاری از محصولات بارش شبکه‌ای (GPPs)^۱ جایگزین مطمئنی برای رکوردهای باران‌سنج شده‌اند. اما GPPها، با توجه به نوع داده و الگوریتم شبکه‌بندی و موارد دیگر، خطاهای ذاتی را در خود جای می‌دهند و از این‌رو ارزیابی آن‌ها، پیش از کاربرد، بسیار مهم است (Dhungana et al., 2023).

1. Gridded Precipitation Product
2. Rostamzadeh
3. Barari siavashkolaei
4. Guo
5. Xiangjiang
6. Li

رویدادهای بارش در منطقه مناسب است. همچنین هنگام استفاده از محصولات بارش در ارتفاعات بالا باید به دست‌کم‌گرفتن^۶ بارش توجه داشت. دولان^۷ و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد پنج محصول بارش ماهواره‌ای (CHIRPS, ERA5, IMERG, LPM و EM) را در برابر مشاهدات بارش ۲۷ ایستگاه هواشناسی در کوهستان آسیا^۸، ارزیابی و عملکرد هر محصول را با توجه به ارتفاع و شاخص‌های شدید، بررسی کردند. نتایج نشان داد که محصولات تحلیل مجدد، مانند ERA5، بیشترین بیش‌برآوردی را داشته‌اند و محصولات مجموعه (Ensemble)، مانند EM، دارای همبستگی بیشتر و عدم قطعیت‌های کمتری با مشاهدات زمینی بوده‌اند. ات-تاکاوی^۹ و همکاران (۲۰۲۴) از معیارهای ارزیابی آماری بهره بردند و دقت چهار محصول بارش مبتنی بر ماهواره (CHIRPS, TRMM, GPM, PERSIANN-CDR) را در چهار حوضه از شمال مراکش، ارزیابی کردند. این پژوهش در سه مقیاس زمانی (روزانه، ماهیانه و سالیانه) و طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ انجام شد. نتایج نشان داد که در هر سه مقیاس مکانی، داده‌های روزانه عملکرد ضعیفی داشتند اما محصولات GPM و TRMM، در مقیاس‌های ماهیانه و سالیانه، بهتر از سایر محصولات بارش عمل کردند.

تخمین الگوهای مکانی-زمانی بارش متوسط و شدید در استان مازندران، از طریق عوامل متعددی از جمله فقدان مشاهدات زمینی، مناطق متنوع آب‌وهوایی و شیب‌های شدید کوه‌نگاری، چالش برانگیز است. مشاهدات نشان داده است که فراوانی بارش‌های شدید در این استان افزایش یافته اما، در مقابل، تعداد وقایع بارش سبک یا اندک کاهش داشته است. باین‌حال مطالعات بارندگی کمتری در این

چین، بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸، ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که MSWEP بهترین عملکرد را با ضریب همبستگی برابر ۰/۷۸، RMSE برابر با ۵ و بایاس نسبی ۵-٪ داشته است. دهاقانی^۱ و همکاران (۲۰۲۳)، به‌منظور ارزیابی دقت محصولات بارش ماهواره‌ای در مدت‌زمان و دوره بازگشت‌های متفاوت و همچنین عملکرد آن‌ها در ارتفاعات و اقلیم‌های گوناگون، سه محصول بارش ماهواره‌ای TRMM-3B42RT, PERSIANN-CCS و CMOROH را در مقیاس‌های زمانی ساعتی، روزانه، ماهیانه و سالیانه در ۵۲ ایستگاه سینوپتیک ایران به کار بردند. به‌منظور ارزیابی دقت این محصولات، از ضریب همبستگی پیرسون (Rp)^۲، ریشه نسبی میانگین مربعات خطا (RRMSE)^۳ و بایاس نسبی (RBias) استفاده شد. نتایج نشان داد که ماهواره CMORPH بیشترین دقت را داشته است. محصولات TRMM و CMORPH نیز بارش را به‌ترتیب، ۵۶٪ و ۸٪ کمتر برآورد کردند؛ درحالی‌که PERSIANN-CCS بارش را ۱۴۳٪ بیش‌ازحد برآورد کرد. اما محصول بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CCS، در تشخیص وقوع یا رخ‌ندادن بارندگی، عملکردی بهتر از سایر محصولات داشته است. شبانکاره^۴ و همکاران (۲۰۲۴)، به‌منظور یافتن روابط بین عدم قطعیت‌های محصول بارشی ماهواره‌ای، از باران‌سنج‌های روزانه به‌منزله داده‌های مرجع بهره بردند و محصول بارش ماهواره‌ای IMERG را در استان فارس ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که محصول IMERG میزان بارندگی سبک (کم) را بیش‌ازحد برآورد می‌کند و در مورد بارش‌های شدید، کم‌برآوردی دارد؛ با این حال بهترین عملکرد را در محدوده بارش ۴۰-۸۰ میلی‌متر بر روز نشان می‌دهد. همچنین دقت محصول، در ماه‌های گوناگون سال، متفاوت بوده است. یانگ^۵ و همکاران (۲۰۲۴a)، در مطالعه‌ای، دقت محصولات بارش IMERG-F, ERA5L, GSMaP-G, و FY4A-QPE را از سه جنبه زمان، مکان و بارش شدید ارزیابی کردند. نتایج نشان داد استفاده از داده‌های ERA5 برای مطالعه روندهای هواشناسی و هیدرولوژیکی، داده‌های IMERG-F در تحلیل بارش شدید و داده‌های GSMaP-G برای بررسی

1. Dehaghani
2. Pearson
3. Root Mean Square Error
4. Shabankareh
5. Yang
6. Underestimating
7. Dollan
8. High Mountain Asia
9. Et-Takaouy

۲۳۸۴۲ کیلومترمربع در شمال کشور ایران و در محدوده ۳۵ 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 و بین رشته‌کوه‌های 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., 2012). آب‌وهوای استان مازندران، به دلیل ویژگی‌های خاص جغرافیایی آن و فاصله کم بین مناطق کوهستانی و دریا، دارای بارش‌های سالیانه نسبتاً درخور 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 و بر میزان دمای هوا افزوده می‌شود.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های به‌کاررفته، در پژوهش حاضر، شامل داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی متعلق به سازمان هواشناسی و محصولات بارش ماهواره‌ای سنجنش از دور است. محصولات بارش مبتنی بر ماهواره تنوع چشمگیری نیز دارند و قادرند برآورد بارش را به مناطقی که با کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری متداول یا توزیع ناهمگون و نامنظم آن‌ها مواجه‌اند، گسترش مؤثری بدهند. به دلیل تأثیر عوامل منطقه‌ای، مانند گردش هوا و توپوگرافی، کاربرد داده‌های بارش به‌دست‌آمده از طریق ماهواره‌ها،

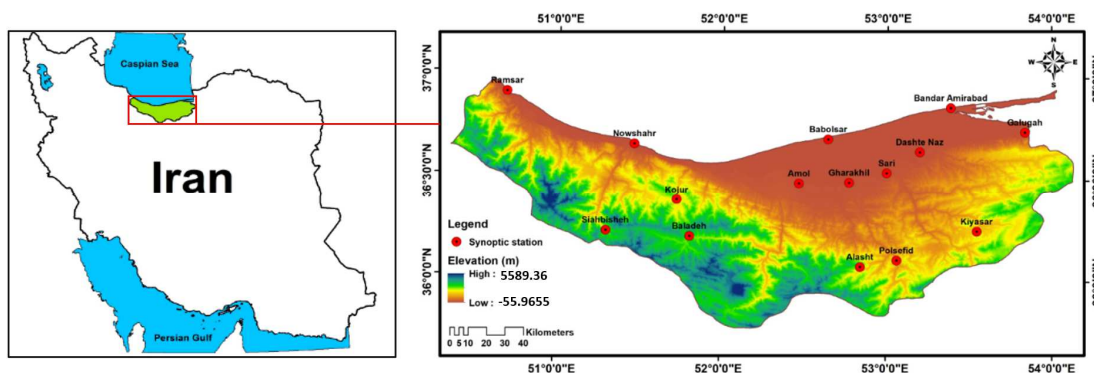
ناحیه انجام شده که اغلب به دلیل دشواری نظارت بر بارش در این منطقه، به‌ویژه نواحی کوهستانی، به دلیل اندازه وسیع و پراکندگی ایستگاه‌های هواشناسی است. بنابراین ارزیابی کیفیت محصولات بارش چندمنبعی و میزان اطمینان به این محصولات، قبل از تحلیل روندها و الگوهای آن‌ها در چنین منطقه‌ای، اساسی است (Dollan et al., 2024).

در نهایت، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بلایای مکرر ناشی از بارش‌های شدید و سیلاب، در نواحی گوناگون استان مازندران، مسئله‌ای اساسی و دائمی است. از این رو ارزیابی جامع محصولات بارش ماهواره‌ای در این منطقه اهمیت ویژه‌ای دارد. هدف از این مطالعه مقایسه محصولات بارش ماهواره‌ای متفاوت با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاهی و ارزیابی عملکرد بارش جهانی در سطح استان مازندران است. این مقایسه به‌شیوه‌ای مکانی- زمانی و در سطح منطقه‌ای و شبکه‌ای انجام شده و برای بررسی دقت محصولات بارش سنجنش از دور ماهواره‌ای، از شاخص‌های ارزیابی آماری بهره‌برداری شده است. نتایج این ارزیابی می‌تواند به بهبود مدیریت بلایای طبیعی و برنامه‌ریزی‌هایی در حوزه منابع آب، در استان مازندران، کمک شایانی کند و در زمینه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی و تحلیل بارش‌ها، نوآوری‌های جدیدی داشته باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی، در این پژوهش، پهنه استان مازندران است (شکل ۱). استان مازندران، با مساحتی بالغ بر



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

نشریه سنجنش از دور و GIS ایران

سال ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵

محصولات بارش CMORPH را مرکز پیش‌بینی آب‌وهوا^۲ از اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) منتشر کرد (Joyce et al., 2004). CMORPH بارندگی جهانی را با وضوح مکانی- زمانی نسبتاً بالای هشت کیلومتر و وضوح زمانی ۰/۵ ساعت تولید می‌کند. در این مطالعه، محصول روزانه CMORPH مشتق شده از سوابق داده‌های آب‌وهوایی اداره ملی اقیانوسی و جوی با سایر محصولات بارش ماهواره‌ای، ارزیابی شد.

ناسا با همکاری JAXA به‌منزله جانشین TMPA^۸ ناسا، محصول بارشی IMERG را توسعه داد. این محصول از محصولات بارشی پرکاربرد مأموریت GPM است که با الگوریتم IMERG تولید شده است (Huffman et al., 2015). آخرین بارش 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، متعلق به سال ۲۰۰۰، ایجاد کرد.

در مناطق گوناگون، تفاوت‌های آشکاری دارد. در مطالعه حاضر، از محصولات بارش CHIRPS^۱، CMORPH^۲، IMERG^۳، PERSIANN-CDR^۴ و SM2RAIN^۴ استفاده شد. جزئیات دریافتی از محصولات ماهواره‌ای بارش، از جمله وضوح مکانی و بازه زمانی، در جدول ۱ آمده است. محصولات CHIRPS از طریق شبکه سامانه‌های هشدار اولیه قحطی USGS^۵ و گروه خطرهای آب‌وهوا در دانشگاه کالیفرنیا توسعه یافت (Funk et al., 2015). این محصول، از سال ۱۹۸۱، محصولات بارشی را با وضوح مکانی بیش از ۰/۵ درجه در سراسر جهان عرضه کرده است. وضوح فضایی خوب و دوره‌های ثبت‌شده نسبتاً طولانی موجب استفاده گسترده از محصولات CHIRPS در سال‌های اخیر شده است (Aksu & Akgül, 2020; Nicholson & Klotter, 2021). این مطالعه محصول نهایی CHIRPS نسخه ۲/۰ (از این پس، CHIRPS) را ارزیابی می‌کند.

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

منبع	دوره‌ی زمانی	وضوح زمانی	وضوح مکانی (درجه)	نام اختصاری	محصول بارش
Skofronick-Jackson et al., (2018)	۲۰۰۰- حال	روزانه	۰/۱	IMERG	Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM Final run V06B
Joyce & Xie (2011)	۱۹۹۸- حال	روزانه	۰/۲۵	CMORPH	Climate Prediction Center (CPC) MORPHing technique bias corrected (CRT)
Funk et al. (2015)	۱۹۸۱- حال	روزانه	۰/۰۵	CHIRPS	Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations
Ashouri et al. (2015)	۲۰۰۷- حال	روزانه	۰/۱	SM2RAIN-ASCAT	Soil Moisture TO RAIN
Ashouri et al. (2015)	۱۹۸۳- حال	روزانه	۰/۲۵	PERSIANN-CDR	Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network

1. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data
2. Climate Prediction Center Morphing Technique
3. Integrated Multi-Satellite Retrievals from GPM
4. Soil Moisture to RAIN
5. The United States Geological Survey
6. Climate Prediction Center
7. National Oceanic and Atmospheric Administration
8. TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis

مشترک، از داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای پراکندگی پیشرفته (ASCAT)^۲، در مقیاس جهانی تولید کردند و برای این کار، الگوریتم SM2RAIN را با وضوح مکانی ۰/۱ درجه یا ۱۰ کیلومتر به کار بردند (Lai et al., 2022). در این مطالعه، SM2RAIN-ASCAT روزانه در ارزیابی مقایسه‌ای استفاده شد.

به‌منظور مقایسه بارش برآوردشده از سنجنده‌های گوناگون مورد مطالعه و بارش مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی، داده‌های بارش درمورد هر ایستگاه زمینی با داده‌های بارش نزدیک‌ترین نقطه یا شبکه از هر سنجنده به آن ایستگاه (در محیط GIS)، مقایسه شد. درعین حال توزیع داده‌های شبکه‌ای محصول CHIRPS در سطح استان به‌گونه‌ای است که در نوار ساحلی نیمه شرقی استان، داده شبکه بارشی وجود ندارد؛ به همین دلیل از مقایسه داده‌های بارش CHIRPS نزدیک‌ترین شبکه به ایستگاه، متعلق به دو ایستگاه بابلسر و امیرآباد که در نواحی ساحلی شرق استان قرار دارند، صرف‌نظر شد. اطلاعات آماری ایستگاه‌های زمینی و فاصله هر ایستگاه تا نزدیک‌ترین نقطه شبکه‌ای از هر محصول بارش، در جدول ۲ بیان شد.

محصول PERSIANN از سوی مرکز آب‌وهواشناسی و سنجش از دور (CHRS)^۱ در دانشگاه کالیفرنیا توسعه یافته است (Ashouri et al., 2015). PERSIANN میزان بارندگی را براساس دمای بالای ابر به‌دست‌آمده از تصاویر IR برآورد می‌کند (Nguyen et al., 2018). PERSIANN CDR^۳، با تأخیر زمانی سه‌ماهه، محصول کالیبره‌شده روزانه بلندمدتی (از سال ۱۹۸۳ تا کنون) با وضوح مکانی ۰/۲۵ درجه است و معمولاً در مطالعات روند آب‌وهواشناسی استفاده می‌شود. محصول بارش PERSIANN-CDR برای تحلیل مقایسه‌ای در این مطالعه به کار رفت.

SM2RAIN از روش‌های جدید توسعه‌یافته «bottom-up» است که بارش را در مناطق وسیعی، بر مبنای مشاهدات رطوبت خاک، تخمین می‌زند (Brocca et al., 2019). برخلاف رویکردهای تولیدی محصولات بارش ماهواره‌ای دیگر که در سطرهای پیشین توضیح داده شد، این محصول از تخمین ویژگی‌های ابرها در روش‌های «bottom-up» اجتناب می‌کند و لایه خاک را به‌منزله باران‌سنج طبیعی در نظر می‌گیرد. SM2RAIN-ASCAT را چند مؤسسه در اروپا به‌طور

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

ردیف	ایستگاه سینوپتیک					فاصله با ایستگاه زمینی (km)	
	نام ایستگاه	Lat - Lon	CHIRPS	CMORPH	IMERG	PERSIANN-CDR	SM2RAIN
۱	آلاشت	۳۶/۰۷-۵۲/۸۴	۱/۷	۶/۷	۶	۶/۷	۵
۲	آمل	۳۶/۴۸-۴۷	۰/۹	۱۴/۲	۳/۷	۱۴/۲	۳/۶
۳	بابلسر	۳۶/۷-۵۲/۶۴	-	۸/۳	۵	۸/۳	۳/۸
۴	بلده	۳۶/۲۱-۵۱/۸۱	۲	۱۱	۱۲/۸	۱۱	۱/۴
۵	بندر امیرآباد	۳۶/۸۵-۵۳/۳۹	-	۲/۳	۹	۲/۳	۶/۳
۶	گلوگاه	۳۶/۷۴-۵۳/۸۴	۱/۷	۱۳	۷	۱۳	۵/۳
۷	قراخیل	۳۶/۴۹-۵۲/۷۷	۱/۴	۱۵/۵	۶/۶	۱۵/۵	۲/۹
۸	کیاسر	۳۶/۲۵-۵۳/۵۵	۳	۱۵	۷	۱۵	۶/۷
۹	کجور	۳۶/۳۹-۵۱/۷۳	۱/۶	۹/۴	۱۰	۹/۴	۲/۸
۱۰	نوشهر	۳۶/۶۶-۵۱/۴۷	۴	۹	۵/۲	۹	۷/۳
۱۱	پل سفید	۳۶/۱۰-۵۳/۰۶	۲/۶	۶	۳/۴	۶	۳/۴
۱۲	رامسر	۳۶/۹۰-۵۰/۶۸	۳/۳	۶/۲	۱/۵	۶/۲	۱/۵
۱۳	ساری	۳۶/۵۴-۵۲/۹۹	۲/۴	۱۴/۸	۹/۶	۱۴/۸	۳/۹
۱۴	دشت ناز	۳۶/۶۴-۵۳/۲۰	۲/۷	۶/۹	۱۱	۶/۹	۴/۴
۱۵	سیاه‌بیشه	۳۶/۲۳-۵۱/۳۰	۲	۱۳/۴	۷/۶	۱۳/۴	۳/۴
	تعداد نقاط ایستگاهی برای منطقه		۱۵	۸۹۴	۶۹	۶۹	۲۵۵

- Center for Hydrometeorology and Remote Sensing
- Climate Data Record
- Advanced Scatterometer

۲-۳- شاخص‌های ارزیابی عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای

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

در این معادلات، N تعداد مشاهدات در سری زمانی، X مقدار بارش ماهواره‌ای، Y مقدار بارش مشاهده‌شده، μ میانگین Cov_{XY} کوواریانس X و Y $Cov_{XY} = \frac{\sum(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)}{N}$ و σ انحراف معیار برابر با $\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X-\mu)^2}{N}}$ است.

برای نشان دادن همبستگی رتبه‌ای بین دو متغیر، از نمایه CC استفاده شد که در اینجا CC رابطه خطی بین بارندگی مشاهده‌شده و بارندگی برآوردشده را نمایان می‌کند. RMSE و MAE به منظور مشخص کردن مقدار اختلاف بین بارش مشاهده‌شده و برآوردشده به کار رفت. RMSE تفاوت بین مجموعه داده مشاهده‌شده و شبکه‌بندی‌شده (محصولات بارش ماهواره) را اندازه‌گیری می‌کند و میانگین بزرگی خطا را تخمین می‌زند.

مقدار RMSE نزدیک به صفر نشان‌دهنده تطابق بهتر بین مجموعه داده شبکه‌بندی‌شده و مشاهده‌شده است. بایاس الگوی کلی بارش برآوردشده را نشان می‌دهد و بیانگر انحراف میانگین پیش‌بینی‌ها از مقادیر واقعی است. مقدار مثبت یا منفی بایاس گویای تخمین بیش از حد (کم‌برآورد) حاصل از مجموعه داده شبکه‌بندی‌شده یا، در اینجا، محصول بارش ماهواره‌ای است؛ در عین اینکه مقدار صفر برآورد کامل را نشان می‌دهد. هرچه مقدار بایاس به صفر نزدیک‌تر باشد، برآورد بارش بهتر بوده است. KGE در ارزیابی جامع تناسب بین بارش برآوردشده و بارش مشاهده‌شده و کیفیت مدل‌های پیش‌بینی به کار می‌رود (Lamontagne et al., 2020). NSE از معیارهای کارایی است که برای ارزیابی توانایی مدل در بازتولید داده‌های مشاهده‌شده یا پیش‌بینی بارش استفاده می‌شود (Vijay & Singh, 2017). هر معیار جنبه خاصی از عملکرد داده‌ها را ارزیابی می‌کند؛ برای نمونه، RMSE روی خطاهای بزرگ و MAE به طور یکنواخت به همه خطاها می‌پردازد، NSE و KGE به توزیع داده‌ها و روابط بین متغیرها حساس‌اند و معیاری مانند بایاس 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 عرضه کند.

جدول ۳. معیارهای ارزیابی مورد مطالعه در پژوهش حاضر و روابط ریاضی آن

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

منبع: Guo et al., 2023

1. Spearman's Rank Correlation Coefficient
2. Mean Absolute Error
3. Kling Gupta Efficiency
4. Nash Sutcliffe Efficiency

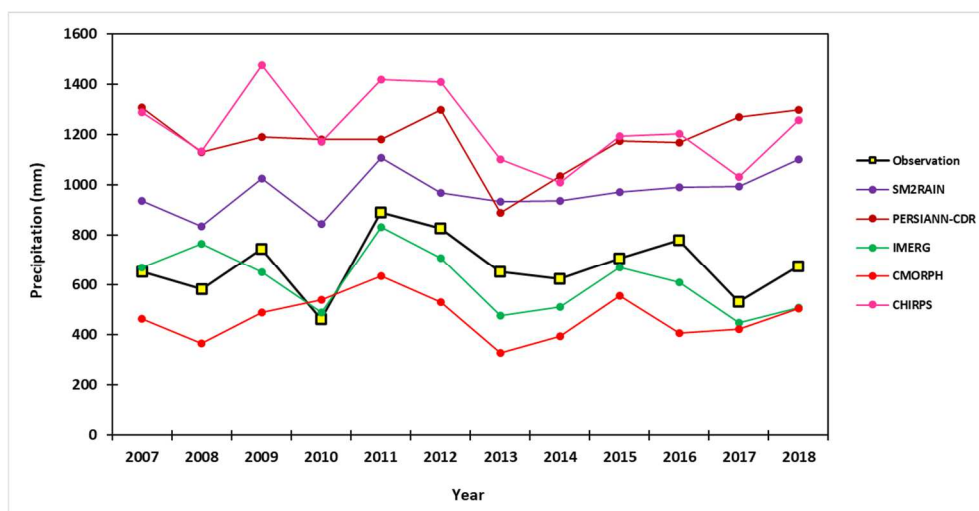
۳- نتایج و بحث

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

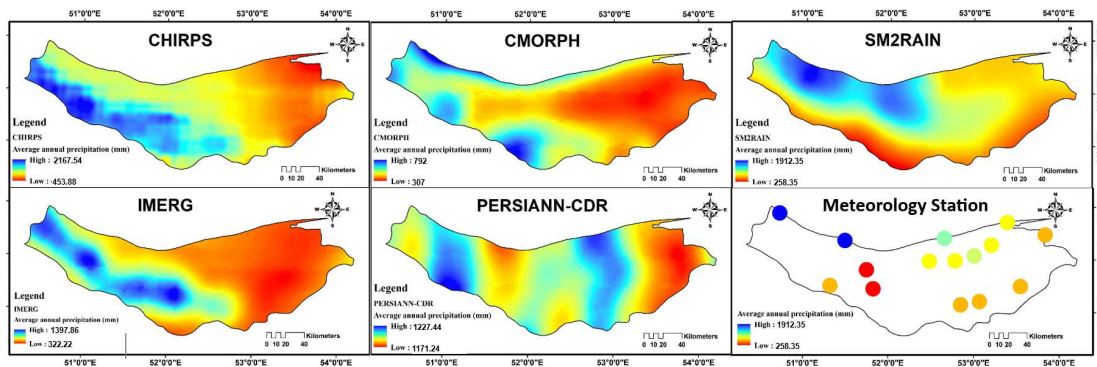
بررسی بارش سالیانه منطقه‌ای درمورد داده‌های مشاهداتی ایستگاه زمینی و سنجنده‌های گوناگون، طی بازه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۸ (شکل ۲)، نشان داده است که بارش برآوردشده از طریق سنجنده‌های CHIRPS، PERSIAN-CDR و SM2RAIN دارای بیش‌برآوردی در قیاس با بارش مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی است. از میان این سه سنجنده، بارش برآوردشده با CHIRPS تفاوت بیشتری با بارش سالیانه 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 سالیانه به داده‌های ایستگاهی مختص سنجنده IMERG است.

برای اینکه تغییرات مکانی محصولات بارش ماهواره‌ای متفاوت بررسی شود، نقشه توزیع مکانی برآوردهای میانگین بارش سالیانه (شکل ۳) همراه با بارش ایستگاهی در سطح استان مازندران، بین سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۸، تهیه و مقایسه شد. مقایسه نقشه‌های بارش سالیانه حاصل از سنجنده‌های CHIRPS، CMORPH، SM2RAIN، IMERG و PERSIAN-CDR با داده ایستگاهی نشان

داده است که توزیع مکانی بارش حاصل از پایگاه‌های CHIRPS و IMERG مشابه‌اند و نواحی کم‌بارش و پر بارش تقریباً منطبق با یکدیگرند؛ به‌گونه‌ای که در این سنجنده‌ها، نیمه شرقی استان دارای کمترین مقدار بارش و در مقابل، نیمه غربی- جنوبی دارای بیشترین مقدار بارش است. درمورد سنجنده‌های CMORPH و SM2RAIN، الگوی تغییرات بارندگی تقریباً مشابه با داده ایستگاهی است؛ درحالی‌که نقشه مکانی بارش متعلق به سنجنده PERSIAN دارای الگوی تغییراتی متفاوت با داده ایستگاهی است. درعین حال مقدار تغییرات در محصولات گوناگون (محدوده تغییرات) بسیار متفاوت است. CHIRPS یکی از مراکز بارندگی (با بارش ۲۱۰۰ میلی‌متر) را نشان می‌دهد که در نواحی جنوب‌غرب توزیع شده است و امکان دارد سیگنالی نادرست باشد که موجب بیش‌برآوردی بارش در این منطقه شده است. اما برعکس، CMORPH دارای کم‌برآوردی به نسبت 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)، station (۷۷۲/۵ میلی‌متر) و CMORPH (۵۴۹/۵ میلی‌متر) می‌شود.



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

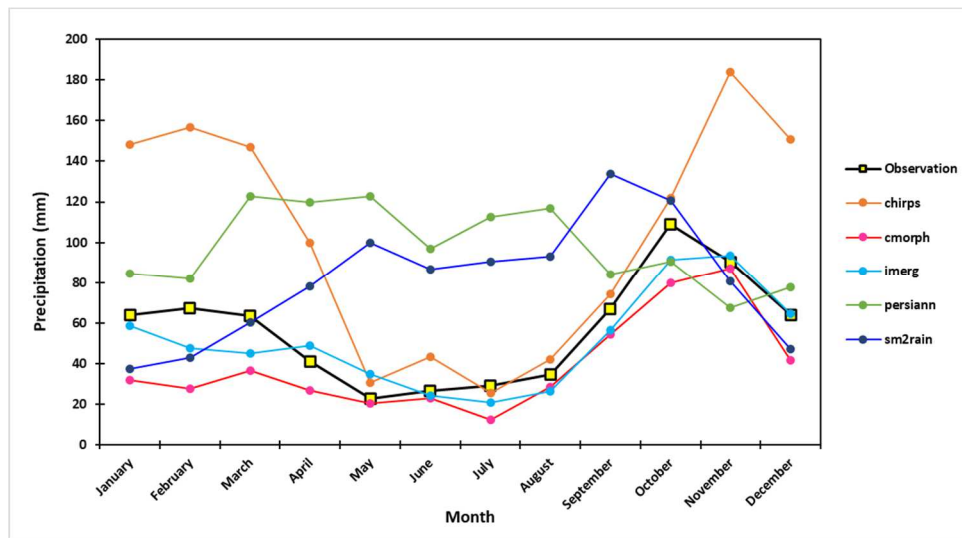


شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی میانگین بارش سالیانه (۲۰۰۷-۲۰۱۸) استخراج شده از سنجنده و ایستگاه‌های زمینی

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

تحلیل داده‌های میانگین ماهیانه بلندمدت منطقه‌ای، در مورد 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) تفاوت بسیار زیادی (بیش‌برآوردی) با داده‌های ایستگاهی داشته‌اند؛ در حالی که در ماه‌های گرم، با داده‌های بارش مشاهداتی، انطباق مناسبی دارند. بارش برآورد شده از طریق سنجنده PERSIAN در اغلب ماه‌ها، در قیاس با داده‌های بارش ایستگاهی، بیش‌برآوردی داشته است و فقط در اکتبر و نوامبر، دارای کم‌برآوردی بوده است. باین حال

بارش حاصل از SM2RAIN، در ماه‌های متفاوت، الگوی رفتاری برعکس با CHIRPS دارد؛ به گونه‌ای که طی ماه‌های گرم دارای بیش‌برآوردی و در ماه‌های سرد کم‌برآوردی است. مقدار بارش برآورد شده در ماه‌های سرد به بارش ایستگاهی نزدیک‌تر است اما در مورد سنجنده‌های IMERG و CMORPH، در مقایسه با سنجنده‌های دیگر، مقدار بارش ماهیانه برآورد شده هم‌خوانی بیشتری با داده‌های ایستگاهی دارد. بارش CMORPH، در مقایسه با داده‌های ایستگاهی، در همه ماه‌ها دارای کم‌برآوردی بوده است و بیشترین انطباق آن در ماه‌های مه، ژوئیه، اوت و نوامبر دیده می‌شود؛ در حالی که بیشترین انطباق بارش ماهیانه حاصل از سنجنده IMERG در ماه‌های ژانویه، ژوئیه، نوامبر و دسامبر بوده است.



شکل ۴. نمودار تحلیل میانگین بلندمدت بارش ماهیانه (۲۰۰۷-۲۰۱۸) منطقه‌ای برای بارش ایستگاهی

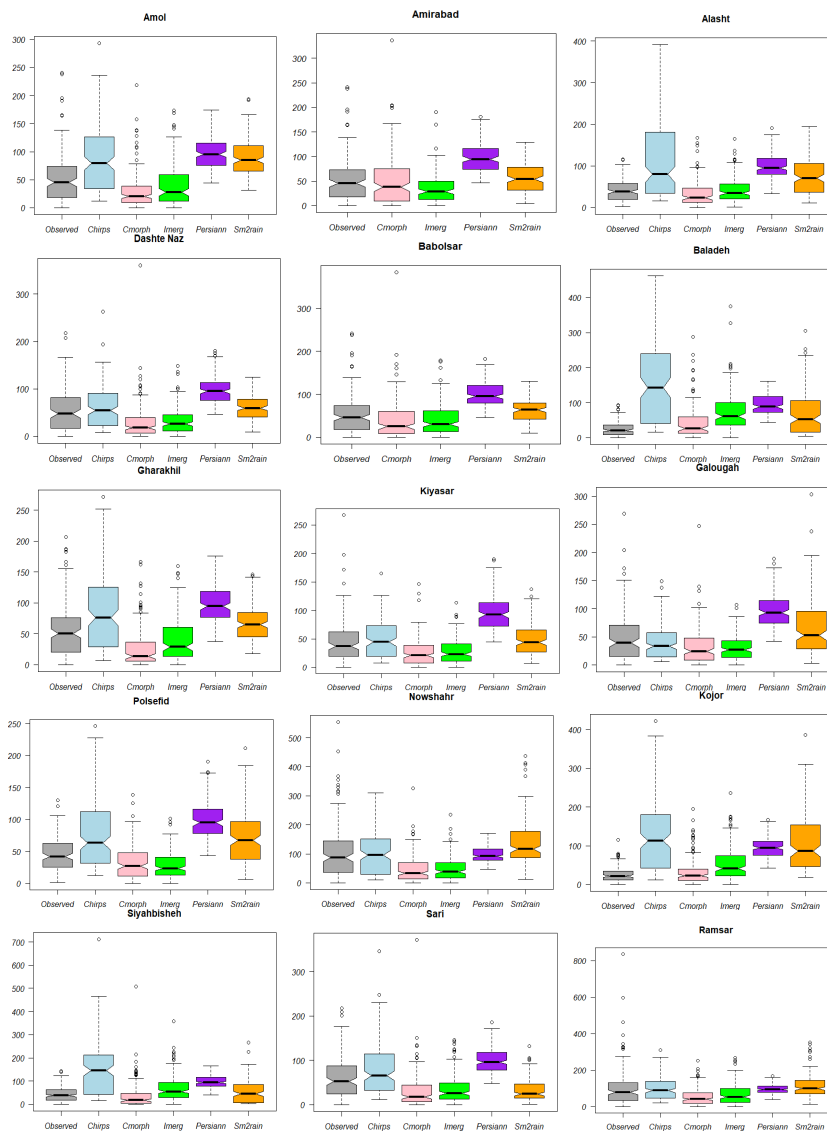
و بارش حاصل از سنجنده‌های مورد مطالعه

نشریه سنجش از دور و GIS ایران

سال ۱۸، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵

می‌شود. 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. سنجنده PERSIANN-CDR نیز، در اغلب ایستگاه‌ها، دارای تفاوت چشمگیری با بارش ایستگاهی، چه در دامنه تغییرات و چه در مقدار میانگین بارش، بوده است.

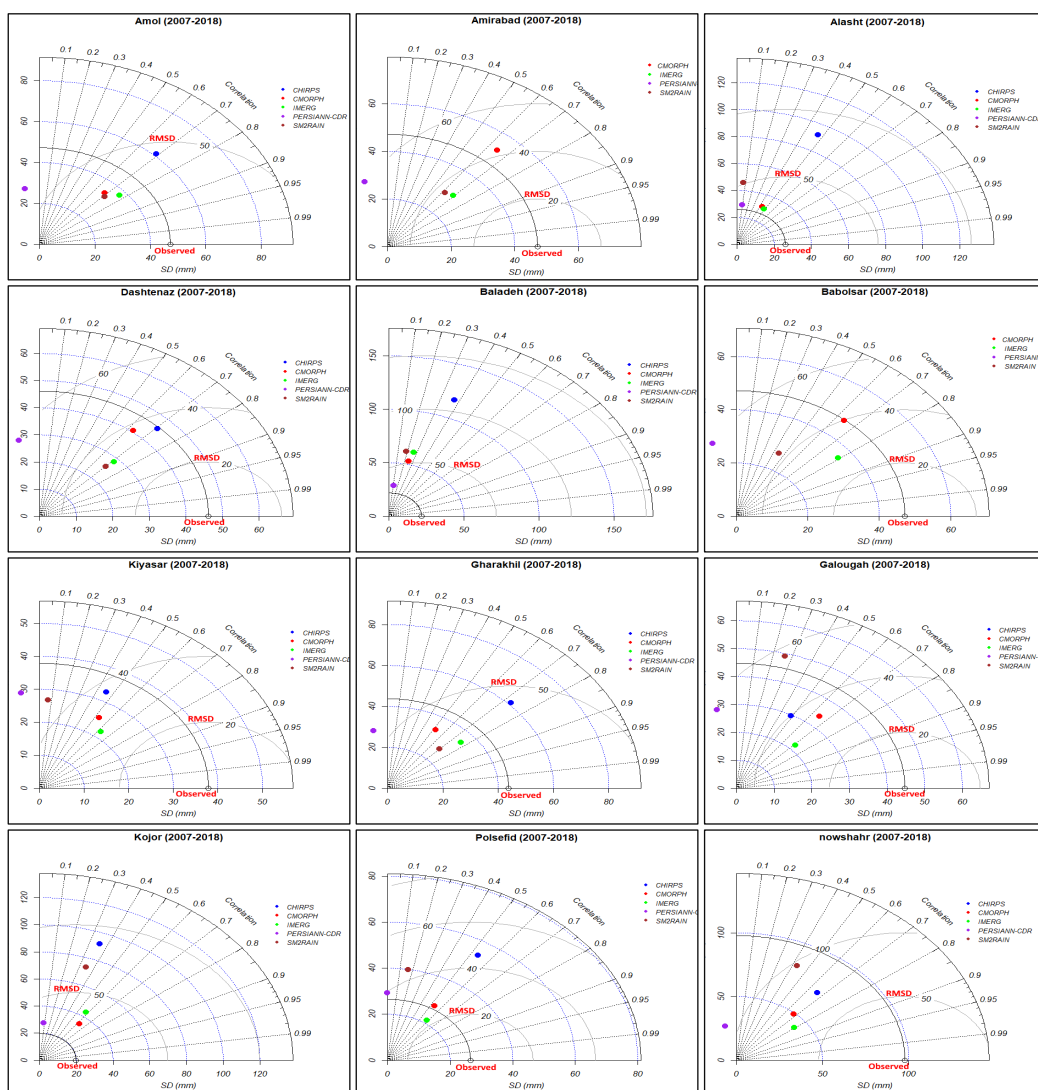
شکل ۵ توزیع بارش ماهیانه را در مورد هر محصول بارش ماهواره‌ای در ایستگاه‌های متفاوت، نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، می‌توان بیان کرد دامنه تغییرات محصولات بارش ماهواره‌ای، در اغلب ایستگاه‌ها، تفاوت زیادی با بارش مشاهداتی ایستگاه‌ها دارد. در سنجنده CHIRPS، داده‌ها در اغلب ایستگاه‌ها، به‌ویژه ارتفاعات، پراکنده‌تر از داده‌های ایستگاه زمینی است و گسترش بیشتری دارد. اما در ایستگاه‌های دشت ناز، نوشهر، کیاسر و رامسر انطباق بیشتری با داده‌های ایستگاهی دیده



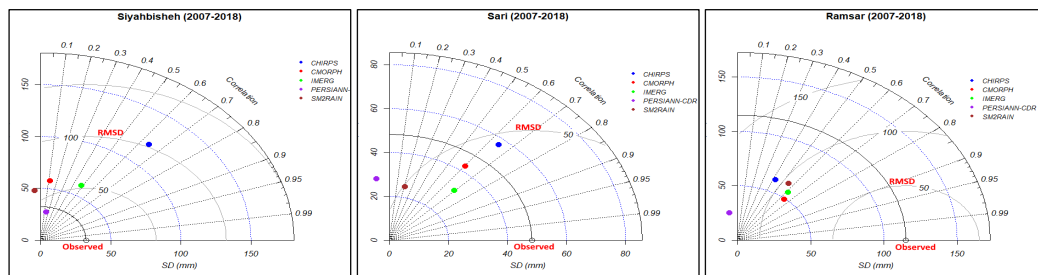
شکل ۵. نمودار جعبه‌ای حاصل از داده‌های بارش ماهیانه برای ایستگاه زمینی و سنجنده‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های متفاوت (محور عمودی برابر با مقدار بارندگی ماهیانه به میلی‌متر است)

و غیره)، کمتر (همبستگی ۰/۳۵) است. داده‌های IMERG نیز از همین الگو پیروی می‌کنند اما دقت تقریباً بیشتری (همبستگی ۰/۸) در قیاس با سه سنجنده پیشین دارند. از دیگر سو، در مورد محصول بارش PERSIAN، دقت داده‌ها در تمامی محصولات مورد مطالعه، پایین و همبستگی آن‌ها بسیار ضعیف است و در نتیجه، در نواحی ساحلی، مقدار همبستگی منفی است.

نتایج ترسیم دیاگرام تیلور (شکل ۶) برای داده‌های بارش ماهیانه ایستگاهی با بارش ماهیانه نزدیک‌ترین نقطه، از سنجنده‌های مطالعه‌شده، به ایستگاه زمینی مورد نظر نشان داده است که محصولات CHIRPS، CMORPH و SM2RAIN در ایستگاه‌های نواحی ساحلی (آمل، دشت ناز، قراخیل و غیره) دقت بیشتری دارد (همبستگی ۰/۷) اما دقت آن، در ارتفاعات (ایستگاه‌های کجور، بلده، سیاه‌بیشه



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



ادامه شکل ۶

کمترین مقدار بایاس با استفاده از سنجنده‌های PERSIAN-CDR و SM2RAIN برآورد شده است. نتایج بررسی مقادیر ضریب همبستگی اسپرمن، با مقایسه بین بارش برآوردشده از طریق سنجنده‌های مورد مطالعه و بارش مشاهداتی ایستگاه‌ها (جدول ۴)، نشان داد که بارش‌های ماهواره‌ای در مناطق گوناگون استان، از نظر همبستگی، دقت‌های متفاوتی دارد. بیشترین ضریب همبستگی در حدود $0/8$ و کمترین آن صفر است. باین‌حال همبستگی دو مجموعه داده بارش حاصل از سنجنده‌های گوناگون، مقادیر متفاوتی را در نواحی مشابه استان نشان داده است؛ با استفاده از سنجنده‌های بیشترین CMORPH، IMERG و SM2RAIN، بیشترین همبستگی ($0/0 - 0/7$) در نواحی ساحلی شرقی استان (مانند گلوگاه و امیرآباد) برآورد شد؛ حال آنکه کمترین مقدار همبستگی ($0/0 - 0/4$) از طریق این سه سنجنده، در نواحی جنوب غرب (مانند بلده و سیاه‌بیشه) که ارتفاعی بیشتر از سطح دریا دارند، مشاهده شد. درمورد سنجنده CHIRPS، بیشترین مقدار همبستگی در نواحی ساحلی استان ($0/0 - 0/7$) و کمترین مقدار آن ($0/4$) در نواحی جنوبی با ارتفاع بالاتر برآورد شد. سنجنده PERSIANN نیز همبستگی مثبت و منفی بسیار ضعیفی ($0/5$) تا $0/32$) را بین سنجنده‌های دیگر نشان داده که بیانگر دقت بسیار پایین بارش ماهیانه استخراج شده از این سنجنده، در قیاس با داده‌های بارش ماهیانه مشاهداتی است؛ به‌طور کلی، از نظر آماره ضریب همبستگی، بیشترین دقت بارش ماهیانه برای مناطق گوناگون استان درمورد سنجنده‌های CHIRPS و IMERG مشاهده می‌شود.

دقت داده‌های بارش ماهیانه استخراج شده از محصولات ماهواره‌ای CHIRPS، CMORPH، IMERG، در مقابل داده‌های PERSIAN-CDR و SM2RAIN، در مقابل داده‌های ایستگاهی در سطح استان مازندران، با استفاده از معیارهای ارزیابی گوناگون ارزیابی شد که نتایج، درمورد کل ایستگاه‌های مطالعه شده، در جدول‌های ۴، ۵ و ۶ ثبت شده است. بررسی مقدار بایاس یا انحراف، بین بارش برآوردشده با استفاده از ماهواره یا از طریق سنجنده‌های مورد مطالعه و داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی (جدول ۴)، نشان داده است که کمترین مقدار بایاس، در تمامی محصولات ماهواره‌ای، در نواحی ساحلی (مانند ایستگاه‌های رامسر، نوشهر و گلوگاه) و بیشترین مقدار بایاس در نواحی کوهستانی دارای ارتفاعات بیشتر (مانند بلده و کجور) برآورد شد؛ نتیجه آنکه در نواحی ساحلی با ارتفاع پایین‌تر از سطح دریا، مقادیر بارش برآوردشده از طریق ماهواره در مقایسه با بارش مشاهده شده در ایستگاه زمینی، اندکی (کمتر از $0/1$ میلی‌متر) کم‌برآوردی (مقدار بایاس منفی) دارد. با پیش‌رفتن به سمت ارتفاعات بالاتر، مقدار بایاس مثبت است؛ این بیان می‌کند که مقدار بارش استخراج شده از سنجنده‌ها، در قیاس با بارش ایستگاه زمینی، بیش‌برآوردی دارد. این الگو، در محصولات بارش گوناگون، دارای اندکی تفاوت است؛ برای مثال، درمورد محصولات CMORPH و IMERG، مقدار بایاس در نیمه شرقی استان منفی برآورد شده است؛ در صورتی که درمورد محصولات یا سنجنده‌های دیگر، مقدار بایاس در این نواحی مثبت است و بیش‌برآوردی دارد. باین‌حال

جدول ۴. نتایج مقایسه بارش ماهیانه ایستگاهی و استخراج‌شده از سنجنده ماهواره‌ای، با استفاده از آماره‌های BIAS و CC، در سطح

استان مازندران

ردیف ایستگاه	موقعیت ایستگاه	CHIRPS		CMORPH		IMERG		PERSIANN		SM2RAIN	
		CC	BIAS	CC	BIAS	CC	BIAS	CC	BIAS	CC	BIAS
۱	رامسر غربی ساحلی	۰/۶۲	-۰/۰۴۶	۰/۶۶	-۰/۰۳۷	۰/۶۶	-۰/۰۳۷	۰/۶۶	-۰/۰۲۵	۰/۰۵۶	۰/۰۴۶
۲	نوشهر غربی ساحلی	۰/۷۸	-۰/۰۶۶	۰/۷	-۰/۰۴۱	۰/۶۹	-۰/۰۴۱	۰/۶۹	-۰/۰۳۲	۰/۰۲۳	۰/۰۴
۳	سیاه‌بیشه غربی مرتفع	۰/۶	۰/۷۸	۰/۱۵	-۰/۰۵	۰/۶۳	۰/۱۸	۰/۶۳	۰/۰۴	۰/۰۵	-۰/۰۱۲
۴	کجور غربی مرتفع	۰/۴۱	۰/۷	۰/۵۸	۰/۰۴۴	۰/۶۱	۰/۱۸۳	۰/۶۱	۰/۰۲	۰/۰۵۶	۰/۰۲۱
۵	بلده غربی مرتفع	۱/۰۷	۰/۳۵	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۰۱۵	۰/۰۳۶	-۰/۰۱
۶	آمل شرقی	۰/۲۳	۰/۷۸	-۰/۰۱۶	۰/۶۵	-۰/۰۹۹	۰/۶۶	۰/۲۹	-۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	۰/۰۷
۷	بابلسر شرقی ساحلی	-	-	-	-	-	-	۰/۱۶	-۰/۰۳۲	-۰/۰۷۴	۰/۰۶۸
۸	قراخیل شرقی	۰/۱۹	۰/۷۶	-۰/۰۲	۰/۵۴	-۰/۰۱۲	۰/۶۸	۰/۲۹	-۰/۰۲۱	۰/۰۸	۰/۰۶۹
۹	آلاشت شرقی مرتفع	۰/۵۱	۰/۴۶	-۰/۰۵۵	۰/۴۵	-۰/۰۰۵	۰/۵۵	۰/۳۹	۰/۰۳	۰/۰۲۴	۰/۰۰۷
۱۰	پل سفید شرقی مرتفع	۰/۲۳	۰/۵۵	-۰/۰۸۲	۰/۵۸	-۰/۰۱۱	۰/۶۱	۰/۳۶	-۰/۰۰۹	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷
۱۱	ساری شرقی	۰/۱۳	۰/۷۲	-۰/۰۲۱	۰/۶۵	-۰/۰۱۹	۰/۶۴	۰/۲۵	-۰/۰۰۲	-۰/۰۲۱	۰/۰۳۱
۱۲	دشت ناز شرقی	۰/۰۶	۰/۷۷	-۰/۰۱۷	۰/۶۵	-۰/۰۱۶	۰/۶۷	۰/۳	-۰/۰۲۶	۰/۰۳۶	۰/۰۷۶
۱۳	کیاسر شرقی مرتفع	۰/۰۲۱	۰/۵۹	-۰/۰۱۳	۰/۷۲	-۰/۰۱۲	۰/۷	۰/۳۵	-۰/۰۱۹	۰/۰۲۱	۰/۰۴۶
۱۴	گلوگاه شرقی	-۰/۰۰۶	۰/۶۸	-۰/۰۱۰	۰/۶۵	-۰/۰۱۳	۰/۸	۰/۳۲	-۰/۰۲۸	۰/۰۱۱۵	۰/۰۳
۱۵	امیرآباد شرقی ساحلی	-	-	-	-	-	-	۰/۲۹	-۰/۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۷۳

مبتنی بر سنجنده را در مقابل بارش مشاهداتی ایستگاه زمینی نشان می‌دهد؛ در صورتی که نیمه غربی استان RMSE کمتر و متغیری دارد. به طور کلی، براساس سنجنده CHIRPS، بیشترین RMSE (دقت کمتر) در نواحی جنوب غرب (۱۴-۱۵ میلی‌متر) برآورد شد و کمترین مقدار RMSE نیز، با استفاده از سنجنده‌های دیگر، در نواحی شرقی غیرساحلی مشاهده شد. از دیگر سو، نواحی ساحلی غربی (رامسر و نوشهر) دارای بیشترین مقدار RMSE (خطای بیشتر) بوده‌اند اما این مقدار، در CHIRPS، در مورد نواحی مرتفع جنوب غرب برآورد شد. مقدار این آماره، در بارش ماهیانه برای سنجنده‌ها و نواحی متفاوت، از ۰ تا ۱۴ میلی‌متر متغیر است و بیشترین مقدار خطا در سنجنده CHIRPS مشاهده می‌شود.

بررسی مقدار آماره KGE، بین بارش برآوردشده از طریق سنجنده و بارش ایستگاهی، نشان داده که مقدار KGE، برای همه محصولات در نواحی ساحلی و نیمه شرقی استان، نزدیک به ۱ (مقدار بهینه) است؛ این مقدار دقت بیشتر در مقدار بارش برآوردشده از این نواحی را در مقایسه با نواحی دیگر نشان می‌دهد. از دیگر سو، در مناطق جنوب غرب استان (مانند بلده و سیاه‌بیشه) که اغلب نواحی مرتفع محسوب می‌شوند، مقدار KGE از مقدار بهینه ۱ فاصله نسبتاً زیادی دارد. با این حال دقیق‌ترین بارش برآوردشده از نظر مقدار KGE بهتر، در سنجنده‌های CMORPH و سپس SM2RAIN مشاهده شد.

نتایج ارزیابی آماری دقت سنجنده‌ها، با استفاده از آماره RMSE (شکل ۸)، نشان داده که کمترین میزان RMSE برای همه سنجنده‌ها در نیمه شرقی استان بوده است که دقت بیشتر در میزان بارش‌های برآوردشده،

جدول ۵. نتایج مقایسه بارش ماهیانه ایستگاهی و استخراج شده از سنجنده ماهواره‌ای، با استفاده از آماره‌های KGE و RMSE، در سطح

استان مازندران

ردیف ایستگاه	موقعیت ایستگاه	SM2RAIN		PERSIANN		IMERG		CMORPH		CHIRPS	
		RMSE	KGE	RMSE	KGE	RMSE	KGE	RMSE	KGE	RMSE	KGE
۱	رامسر غربی ساحلی	۸/۰۴	۰/۳۱	۱۰/۲۸	-۰/۴۸	۸/۳۲	۰/۱۴	۸/۸۳	۰/۰۰۸	۸/۷۸	۰/۳۷
۲	نوشهر غربی ساحلی	۸/۶۵	۰/۳۲	۹/۰۴	-۰/۵۲	۷/۶	-۰/۰۲	۷/۹۴	۰/۰۰۱	۶/۱۸	۰/۵۸
۳	سیاببیشه غربی مرتفع	۴/۹۶	-۰/۳۳	۵/۵۶	-۰/۷۹	۴/۹	-۱/۰۸	۵/۲۵	-۰/۰۰۲	۱۲/۷	-۱/۱۵
۴	کجور غربی مرتفع	۸/۸۹	-۱۳/۵	۶/۵	-۴/۱	۳/۷۱	-۲/۵۶	۲/۳۱	-۰/۲۵	۱۱/۰۹	-۲۰/۸
۵	بلده غربی مرتفع	۶/۹۱	-۶/۰۸	۷/۰۸	-۳/۹۳	۷/۲۲	-۶/۹	۵/۱۵	-۲/۶۹	۱۵/۷۱	-۳۱/۷
۶	آمل شرقی	۴/۰۴	۰/۲۷	۶/۰۸	-۰/۴۷	۲/۷۸	۰/۴	۳/۵۱	۰/۱۹	۴/۶۳	-۰/۲۶
۷	بابلسر شرقی ساحلی	۴/۱	۰/۲۷	۸/۱۳	-۰/۴۷	۴/۱۷	۰/۱۵	۴/۸۲	۰/۲	-	-
۸	قراخیل شرقی	۲/۸۱	۰/۵۴	۵/۹	-۰/۴۳	۲/۷۸	۰/۳۷	۴/۰۴	۰/۰۷۱	۴/۱۷	-۰/۲۱
۹	آلاشت شرقی مرتفع	۵/۱۵	-۱/۵۲	۵/۷	-۱/۳۵	۲/۴	۰/۵۳	۲/۶۵	۰/۴۲	۹/۲۴	-۷/۸۷
۱۰	پل سفید شرقی مرتفع	۴/۲۴	-۰/۶۶	۵/۵	-۱/۱۱	۲/۳	۰/۲۹	۲/۴	۰/۴۶	۴/۶۸	-۱/۶۴
۱۱	ساری شرقی	۴/۸۷	-۰/۱۲	۵/۸۳	-۰/۱۷	۳/۶۸	۰/۱۶	۴/۲۲	۰/۱۹۵	۴/۰۴	۰/۳۳
۱۲	دشت ناز شرقی	۲/۹	۰/۵۲	۶/۱	-۰/۴۹	۳/۳۳	۰/۱۷	۳/۷۵	۰/۲۴	۳/۰۱	۰/۶۹
۱۳	کیاسر شرقی مرتفع	۳/۷۵	۰/۰۱۲	۵/۹۶	-۰/۷۳	۲/۸۵	۰/۲	۳/۱۴	۰/۲۱	۳/۱	۰/۵۸
۱۴	گلوگاه شرقی	۴/۹۴	۰/۰۹۵	۶/۱۸	-۰/۶۲	۳/۱۴	۰/۱۹	۳/۱۳	۰/۳۳	۳/۴	۰/۴۲
۱۵	امیرآباد شرقی ساحلی	۳/۶۵	۰/۴۸	۶/۵۴	-۰/۵۲	۳/۵۶	۰/۲۱	۳/۷	۰/۷۴	-	-

بارش برآورد شده از طریق سنجنده‌ها را در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاهی، از نظر این آماره، نشان می‌دهد. محدوده تغییرات NSE با استفاده از سنجنده CMORPH (از ۶- تا ۰/۵)، در مناطق گوناگون استان، کمتر از سنجنده‌های دیگر است؛ یعنی دقت این سنجنده از سنجنده‌های دیگر، در نواحی گوناگون استان، بیشتر است. در عین حال نیز سنجنده‌هایی، مانند CHIRPS و SM2RAIN، مقدار NSE را برای نواحی مرتفع جنوب غرب به ترتیب، تقریباً ۶۰- و ۲۷- برآورد کرده‌اند که دقت نسبتاً کم داده‌های بارش ماهیانه مستخرج از سنجنده‌ها را از نظر شاخص NSE می‌رساند.

در مورد آماره MAD نیز، مشابه با الگوی تغییرات RMSE، کمترین مقدار این آماره (نزدیک به صفر) در نواحی شرقی است که دقت بیشتر بارش برآورد شده، از طریق سنجنده‌های مورد مطالعه در نیمه شرقی استان را بیان می‌کند؛ در صورتی که مقدار این آماره، به سمت نواحی غربی و مرتفع، افزایش یافته است. نتایج براساس آماره NSE نشان داده است که مقدار این آماره، در سنجنده‌های گوناگون، متفاوت است؛ به طوری که بهینه‌ترین مقدار این آماره برای سنجنده‌های CHIRPS، CMORPH، و IMERG بین ۰/۵-۰ در نیمه شرقی استان و نواحی ساحلی است که دقت بیشتر

جدول ۶. نتایج مقایسه بارش ماهیانه ایستگاهی و استخراج شده از سنجنده ماهواره‌ای، با استفاده از آماره‌های NSE و MAD، در سطح استان مازندران

ردیف	ایستگاه	موقعیت ایستگاه	CHIRPS		CMORPH		IMERG		PERSIANN		SM2RAIN	
			MAD	NSE	MAD	NSE	MAD	NSE	MAD	NSE	MAD	NSE
۱	رامسر	غربی ساحلی	۰/۱۶	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۴۳	۰/۲۴۵	۰/۳۷	-۰/۱۶	۰/۵۷	۰/۳	۰/۴۷
۲	نوشهر	غربی ساحلی	۰/۴۲	۰/۳۳	۰/۵۲	۰/۴۳	۰/۱۳	۰/۴۴	-۰/۲۳	۰/۵۶	-۰/۱۲	۰/۵۲
۳	سیاه‌بیشه	غربی مرتفع	-۲۱/۲۴	۰/۸۲	-۲/۸	۰/۲۸	-۲/۳۲	۰/۲۴	-۳/۲۶	۰/۴	-۲/۲۹	۰/۳۶
۴	کجور	غربی مرتفع	-۴۳/۹۵	۰/۷۲	-۰/۹۵	۰/۱۳	-۴/۰۴	۰/۲۲	-۱۴/۱۹	۰/۴۹	-۲۷/۹	۰/۵۸
۵	بلده	غربی مرتفع	-۶۲/۳۴	۱/۱۲	-۵/۷۹	۰/۳	-۱۲/۳۶	۰/۴۵	-۱۱/۸۶	۰/۵۸	-۱۱/۲۶	۰/۴۷
۶	آمل	شرقی	-۰/۳۹	۰/۲۹	۰/۲	۰/۲۱	۰/۵	۰/۱۶	-۱/۴	۰/۴۲	-۰/۰۶	۰/۲۹
۷	بابلسر	شرقی ساحلی	-	-	-	۰/۱۳	۰/۲۸	۰/۳۵	-۰/۲۹	۰/۴۸	۰/۳۸	۰/۲۶
۸	قراخیل	شرقی	-۰/۳۱	۰/۲۵	-۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۱۶	-۱/۶	۰/۴۱	۰/۴	۰/۱۹
۹	آلاشت	شرقی مرتفع	-۱۷/۱۸	۰/۵۵	-۰/۴۹	۰/۱۷	-۰/۲۳	۰/۱۵	-۵/۸۸	۰/۴۱	-۴/۵۵	۰/۳۵
۱۰	پل سفید	شرقی مرتفع	-۳/۴۹	۰/۲۹	-۰/۱۹	۰/۱۶	-۰/۰۸	۰/۱۴	-۵/۱۲	۰/۳۹	-۲/۶۵	۰/۲۸
۱۱	ساری	شرقی	-۰/۰۱	۰/۳۴	-۰/۰۱	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۲۲	-۱/۱	۰/۴	-۰/۴۶	۰/۳
۱۲	دشت ناز	شرقی	۰/۳۸	۰/۱۸	۰/۴۸	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۲	-۱/۵	۰/۴۳	۰/۴۵	۰/۱۹
۱۳	کیاسر	شرقی مرتفع	۰/۰۳۳	۰/۱۷	۰/۰۱۳	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۴	-۲/۵۶	۰/۴۲	-۰/۴	۰/۲۳
۱۴	گلوگاه	شرقی	۰/۱۶۵	۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۱۶	-۱/۷۴	۰/۴۳	-۰/۷۴	۰/۳
۱۵	امیرآباد	شرقی ساحلی	-	-	۰/۳۲	۰/۲	۰/۳۷	۰/۱۹	-۱/۱	۰/۴۶	۰/۳۵	۰/۲۱

بوده‌اند. بهترین میزان همبستگی محصولات بارش مورد مطالعه، در پهنه استان مازندران، اغلب به نواحی شرقی نزدیک سواحل (تا ۰/۸) بازمی‌گردد. باین حال الگوی همبستگی در ایستگاه‌های گوناگون و درمورد محصولات مطالعه‌شده، متفاوت است. محصولات IMERG و CMORPH بیشترین ضریب همبستگی (۰/۰-۰/۸) را بین محصولات دیگر داشتند؛ درحالی‌که داده‌های بارش PERSIAN-CDR دارای همبستگی بسیار ضعیفی (نزدیک صفر و در اغلب موارد، منفی) بود. این نتیجه نشان می‌دهد که داده بارش برآورده شده با PERSIAN-CDR رابطه بسیار کم‌رنگی با مشاهدات بارش زمینی دارد و الگوی متفاوتی را دنبال می‌کند. با توجه به توپوگرافی پیچیده منطقه و پراکندگی ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش زمینی، عملکرد ضعیف محصول بارش PERSIANN-CDR را می‌توان درک کرد (Khettouch

در نهایت، براساس نتایج این پژوهش، می‌توان اظهار داشت هر محصول با توجه به نوع توپوگرافی و اقلیم منطقه، نتیجه‌ای متفاوت در تخمین بارش ارائه می‌دهد و بر مبنای نوع رخدادهای در هر منطقه، به مطالعات بیشتر و بررسی جزئی‌تر هر محصول نیاز است (Rasoulzadeh et al., 2022). میانگین بارش سالیانه منطقه‌ای، در محصولات IMERG و CMORPH، به میانگین بارش سالیانه مشاهداتی نزدیک‌تر بوده است. درمورد میانگین بارش ماهیانه منطقه‌ای نیز این دو محصول، در تمامی ماه‌ها، انطباق بیشتری با میانگین بارش مشاهداتی ایستگاه‌ها داشتند؛ در صورتی‌که محصول CHIRPS، فقط در ماه‌های گرم (مه تا اکتبر)، دارای انطباق مناسبی با داده‌های ایستگاهی بود. محصولات مطالعه‌شده، در اغلب موارد، برای نواحی کم‌ارتفاع (به‌ویژه نواحی ساحلی) دارای کم‌برآوردی و در نواحی مرتفع، دارای بیش‌برآوردی

۰/۸ تا ۱، BIAS برابر با ۱، KGE برابر با ۲۰- تا ۳۰- و CC برابر با ۰/۴ تا ۰/۵ است.

محصول CMORPH. در سواحل، کم‌برآوردی و در ارتفاعات، بیش‌برآوردی دارد. در نواحی کم‌ارتفاع، تحت تأثیر فاصله از ایستگاه است؛ هرچه فاصله کمتر باشد، قطعیت افزایش می‌یابد. تحت تأثیر توپوگرافی قرار دارد. در نواحی ساحلی و کم‌ارتفاع، RMSE برابر با ۰-۶ میلی‌متر، NSE برابر با ۱۰- تا ۰، MAD برابر با ۰/۴-۰، BIAS برابر با ۰/۴- تا ۰، KGE برابر با ۰ تا ۱، و CC برابر با ۰/۶ تا ۰/۸ اما در نواحی کوهستانی، RMSE برابر با ۰ تا ۶ میلی‌متر، (در نواحی ساحلی غرب)، NSE برابر با ۶-، MAD برابر با ۰/۴۵ (در نواحی ساحلی غرب)، BIAS برابر با ۰-۲، KGE برابر با ۳۰- و CC برابر با ۰/۴ است.

محصول IMERG. در نواحی ساحلی و نیمه شرقی، دارای کم‌برآوردی و در نواحی کوهستانی و مرتفع، دارای بیش‌برآوردی است. در نواحی کوهستانی، فاصله از ایستگاه (برای مثال ایستگاه بلده) باعث کاهش عملکرد مدل و افزایش عدم قطعیت شده است. تحت تأثیر توپوگرافی قرار دارد و عملکرد محصول، در نیمه شرقی استان، بیشتر از نیمه غربی است. در نیمه شرقی استان، RMSE برابر با ۲-۴ میلی‌متر، NSE برابر با ۰ تا ۰/۵، MAD برابر با ۰/۱۴-۰/۳، BIAS برابر با ۰/۱۲-، KGE برابر با ۰ تا ۱، و CC برابر با ۰/۶ تا ۰/۸ اما در نیمه غربی، RMSE برابر با ۷-۹، NSE برابر با ۱۲- (در ایستگاه بلده)، MAD برابر با ۰/۴، BIAS برابر با ۰-۲ (نواحی ساحلی غربی بایاس مثبت دارد)، KGE برابر با ۷-، و CC برابر با ۰/۴ است.

محصول PERSIANN-CDR. در اغلب نواحی (به جز نواحی ساحلی غرب) بیش‌برآوردی دارد و این مقدار در نواحی کوهستانی بیشتر است. با توجه به معیارهای ارزیابی گوناگون، دارای الگوی متفاوتی است. کمترین مقدار RMSE و MAD (به ترتیب، ۵-۶ میلی‌متر و ۳۵/۴۵-۰/۰) در نیمه شرقی و بیشترین آن (به ترتیب، ۱۰-۹ و ۵۵/۰-۰/۶) در نواحی ساحلی غرب مشاهده شد.

(et al., 2023). همچنین در ایستگاه‌های زمینی، با اندازه‌گیری بارش ماهیانه از طریق محصولات گوناگون، از ۰ تا ۱۵ میلی‌متر خطا وجود داشت که محصولات CMORPH و IMERG کمترین خطا (۲-۴ میلی‌متر) را در اغلب مناطق استان داشتند؛ کمترین میزان خطا اغلب در نیمه شرقی استان دیده شد. یکی از مشکلات CMORPH عملکرد پایین آن در تشخیص بارش برف و بارندگی طی فصل سرد است و برای بارش در این فصل، کم‌برآوردی دارد (Xie et al., 2017). مقایسه نتایج معیارها و شاخص‌ها، در بیشتر محصولات، نشان داد که تغییرات ارتفاعی در برآورد بارش تأثیر می‌گذارد و اغلب موارد، بارش در ایستگاه‌های مرتفع با دقتی کمتر از ایستگاه‌های واقع شده در نوار ساحلی دریای خزر برآورد شده است. علت اختلاف بین دو مجموعه داده ماهواره‌ای و زمینی، در برخی مناطق، ممکن است کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی باشد که موجب ایجاد خطاهای درون‌یابی بزرگ در داده‌های شبکه‌ای می‌شود. به علاوه، از جمله مواردی که موجب اختلاف دو مجموعه بارش می‌شود، می‌توان به منابع متفاوت داده‌های بارش زمینی، تفاوت در مکان ایستگاه‌ها و شبکه‌های توزیع بارش، تفاوت در روش ارزیابی و نیز در مقیاس زمانی یا منطقه مورد مطالعه اشاره کرد (Lei et al., 2022; Yang et al., 2024b)

درکل، در توضیح رفتار هر محصول بارش ماهواره‌ای، می‌توان این موارد را به‌طور خلاصه بیان کرد:

محصول CHIRPS. دارای کم‌برآوردی در سواحل و بیش‌برآوردی در ارتفاعات است و در نیمه شرقی استان، عملکرد کلی بهتری دارد. فاصله از ایستگاه زمینی، در بررسی ایستگاه- شبکه تأثیر چندانی در عملکرد بارش ندارد و عملکرد محصول بیشتر تحت تأثیر توپوگرافی است. خلاصه معیارهای آماری به‌گونه‌ای است که در نواحی ساحلی و کم‌ارتفاع، RMSE برابر با ۰-۴ میلی‌متر، NSE برابر با ۰ تا ۱۰-، MAD برابر با ۰ تا ۰/۴، BIAS برابر با ۰/۰۶- تا ۰، KGE برابر با ۱۰- تا ۱ و CC برابر با ۰/۶ تا ۰/۸ اما در نواحی کوهستانی، RMSE برابر با ۱۲- ۱۵ میلی‌متر، NSE برابر با ۴۰- تا ۶۰-، MAD برابر با

برای منطقه دارد. محمودی بابلان^۲ و همکاران (۲۰۲۲)، در ارزیابی دقت چهار محصول بارش ماهواره‌ای TRMM و IMERG، CHIRPS، PERSIANN-CDR طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۴۰۰ در مورد محدوده نوار ساحلی غرب دریای خزر، نتیجه گرفتند که محصول IMERG دقتی بیشتر از محصولات دیگر داشته و ضعیف‌ترین عملکرد به ماهواره‌های TRMM و PERSIANN-CDR متعلق است. قربانیان^۳ و همکاران (۲۰۲۲) توانایی شش محصول بارش ماهواره‌ای (CHIRPS، TMPA، GSMAP، IMERG، PERSIANN و ERA5) در ایران (۲۰۲۰-۲۰۰۰) را در مقیاس‌های زمانی متفاوت (روزانه، ماهیانه و سالیانه)، با استفاده از معیارهای ارزیابی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج براساس معیارهای ارزیابی نشان داد که اگرچه هیچ‌یک از محصولات بارش ماهواره‌ای عملکرد مناسبی نداشت، با در نظر گرفتن تمامی تحقیقات، محصول GSMAP دارای عملکرد نسبتاً بهتری در برآورد بارش روزانه بود (RMSE برابر با ۳/۵ میلی‌متر و CC برابر با ۰/۵۹۹) و تمامی محصولات بارش در ماه‌های خشک نیز دقت بهتری داشتند. نتایج پژوهش رسول‌زاده^۴ و همکاران (۲۰۲۲) در ارزیابی محصولات بارش با استفاده از ماهواره TRMM، CHIRPS، PERSIANN-CDR و GPM-IMERG در نواحی شمال و شمال‌غرب کشور، طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۴۰۰، نشان داد که مقدار خطا در همه محصولات، از نواحی جنوب‌غرب به سمت نواحی شرق و نوار ساحلی خزر، افزایش یافته است. در ارزیابی میانگین منطقه‌ای بارش‌ها، CHIRPS، IMERG و PERSIANN-CDR نتایجی نزدیک‌به‌هم داشتند و IMERG، با اختلاف جزئی، برتری داشت. ناصری^۵ و همکاران (۲۰۲۲) نیز، با تصحیح و ارزیابی هشت مجموعه داده جهانی بارش ماهیانه در شمال‌غرب ایران، نتیجه گرفتند که در سراسر

اما شاخص NSE، در نیمه شمالی ساحلی، کمتر (۰ تا ۲-) و در نواحی کوهستانی غربی، بیشتر (۱۴-) است. کمترین مقدار BIAS در سواحل غربی (۰ تا ۰/۰۷-) کم‌برآوردی و بیشترین آن در نواحی کوهستانی غربی (۰/۰۶+) بیش‌برآوردی مشاهده شد؛ در حالی که KGE نیز، همانند NSE، در نیمه شمالی کمترین مقدار (۰ تا ۱-) و در نواحی کوهستانی، بیشترین مقدار (۴-) را دارد. مقدار همبستگی ضعیف و منفی است. تغییرات ارتفاعی در عملکرد محصول بارش تأثیر گذاشته است اما فاصله از ایستگاه چندان تأثیرگذار نیست.

محصول SM2RAIN. در اغلب ایستگاه‌ها (به جز ساری و بابلسر) دارای بیش‌برآوردی است و عملکرد محصول بارش تحت تأثیر توپوگرافی منطقه قرار دارد. عملکرد و دقت، در نواحی کم‌ارتفاع (نواحی شرقی)، بیشتر از نواحی کوهستانی دیده شد و فاصله از ایستگاه در 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). نیمه شرقی استان عملکردی بالاتر از نیمه غربی دارد. در نواحی شرقی، RMSE برابر با ۲-۴، NSE برابر ۰-۰/۵، MAD برابر با ۰/۱۵-۰/۳، BIAS برابر با ۰/۰۲-، KGE برابر با ۱-۰ و CC برابر با ۰/۸-۰/۶ است اما در نواحی غربی، RMSE برابر با ۸-۹، NSE برابر ۲۵-، MAD برابر با ۰/۵-۰/۶، BIAS برابر با ۰/۴-۰/۶، KGE برابر با ۱۴- تا ۱۲- و CC برابر با ۰/۱۲- تا ۰ است. با توجه به نتایج آماری، می‌توان اظهار داشت در نیمه غربی استان که شدت تغییرات توپوگرافی بیشتر از مساحت است و فاصله دریا و کوه اندک است، محصولات بارش ماهواره‌ای عدم قطعیت بیشتری دارند (Nadi & Yousefi Kebriya, 2024).

مطالعات گوناگونی در بخش‌های متفاوت ایران انجام شده که نتایجی مشابه با پژوهش حاضر داشته است. معظمی^۱ و همکاران (۲۰۱۶)، در مطالعه‌ای، نشان دادند که از میان محصولات بارش PERSIANN، TMPA و CMORPH، محصول بارش CMORPH عملکرد بهتری

1. Moazami
2. Mahmoudi Babolan
3. Ghorbanian
4. Rasoulzadeh
5. Nasser

اندازه‌گیری بارش، با تفکیک مکانی و زمانی مناسب، در پیش‌بینی الگوهای آب‌وهوایی بسیار اهمیت دارد زیرا اندازه‌گیری دقیق مقدار بارش در سطح زمین، به دلیل پراکندگی شبکه‌های باران‌سنجی، توپوگرافی و تنوع مکانی و زمانی رویدادها، مسئله مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. جدیدترین ابزارها و روش‌ها، برای برآورد مقدار کمی بارش، به کاربردن سامانه‌های سنسجش از دور و الگوریتم‌هایی ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی است (Mahmoudi Babolan et al., 2022). بر همین اساس، در این مطالعه، دقت پنج محصول بارش ماهواره‌ای CHIRPS، CMORPH، IMERG، PERSIANN-CDR و SM2RAIN در مقیاس‌های زمانی ماهیانه و سالیانه و مقیاس‌های مکانی ایستگاهی و منطقه‌ای، طی دوره زمانی ۲۰۰۷-۲۰۱۸، ارزیابی شد. نتایج نشان داده است که در هر پنج محصول مطالعه‌شده، دقت داده‌های ماهیانه بیشتر از سالیانه بود. محصولات IMERG و CMORPH دقت تقریباً مشابهی داشتند اما، در بیشتر شاخص‌ها، محصول PERSIANN-CDR اختلاف زیادی با محصولات دیگر داشت. مهم‌ترین چالشی که محصولات بارش ماهواره‌ای، در این مطالعه، با آن مواجه بودند پیچیدگی‌های توپوگرافی منطقه و نزدیکی و هم‌جواری با دریای خزر است؛ به‌گونه‌ای که از نواحی شمالی به سمت نواحی جنوبی، اختلاف ارتفاع ۵۶۰۰ متری وجود دارد. به همین دلیل، همه محصولات سوگیری‌هایی نسبت به توپوگرافی داشتند و در مناطقی با ارتفاع بیشتر، دچار اختلال در تخمین دقیق بارش شدند. از دلایل مؤثر در بروز خطا، در محصولات بارش ماهواره‌ای و اختلاف در برآورد بارش، می‌توان به تفاوت دقت مکانی هر محصول نیز اشاره کرد. چه بسا بارش، در منطقه‌ای، با مقیاسی کوچک‌تر از پیکسل ماهواره‌ها رخ دهد و یا بارش برآوردشده در پیکسل‌های مجاور، در پیکسلی که ایستگاه در آن قرار گرفته است، ثبت شود. با توجه به نتایج، محصول IMERG در تمامی شاخص‌های

حوضه، محصول IMERG بهترین عملکرد را در برآورد تغییرات زمانی و مکانی بارش ماهیانه داشته است. در مطالعه‌ای دیگر، دهاقانی و همکاران (۲۰۲۳) عملکرد سه محصول بارش ماهواره‌ای PERSIANN، TRMM و CMORPH را در ۵۲ ایستگاه سینوپتیک ایران، در مقیاس‌های زمانی متفاوت، ارزیابی کردند. در پژوهش آن‌ها، TRMM و CMORPH بارش به ترتیب، ۵۶ و ۸٪ کمتر برآورد شد؛ درحالی‌که PERSIANN بارش ۱۴۳٪ بیش از حد برآورد شده و تمامی محصولات در تشخیص دقیق وقوع بارش، برای شمال شرق و جنوب غرب، عملکرد مناسبی داشته است. خرمی^۱ و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد چهارده محصول بارش ماهواره‌ای را در ترکیه بررسی و مقایسه کردند. نتایج نشان داد که از بین این محصولات، بارش‌های برآوردشده با IMERG، MSWEP و TRMM عملکرد بهتری در مقیاس‌های ماهیانه و سالیانه داشتند. نتایج پژوهش نوذرپور^۲ و همکاران (۲۰۲۴) از ارزیابی دقت محصولات بارش IMERG، MSWEP، TRMM و PERSIANN-CDR در ۸۱ ایستگاه سینوپتیک ایران، طی سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۹، با استفاده از شاخص‌های ارزیابی CC، KGE، RMSE و BIAS نشان داد که MSWEP دارای دقت بهتری بود و PERSIANN-CDR نیز بیشترین RMSE ماهیانه را داشت. از طرف دیگر TRMM، در مناطق خشک‌تر با بارش کم تا متوسط، عملکرد بهتری نشان داد و IMERG بارش را در همه فصل‌ها بیش از حد برآورد کرد. بنابراین می‌توان بیان کرد، اگرچه چندین مجموعه داده جهانی بارش برای مطالعه و برآورد بارندگی در هر منطقه از جهان در دسترس قرار دارد، به منظور کاربرد محلی یا منطقه‌ای این مجموعه داده‌ها، باید خطاهای احتمالی در محصولات اصلی را در نظر گرفت و تصحیح کرد (Nasseri et al., 2022).

۴- نتیجه‌گیری

در تحلیل رویدادهای اقلیمی و هیدرولوژیکی، بارش به‌منزله پارامتری اصلی مطرح می‌شود. درعین حال

1. Khorrami
2. Nozarpour

- Barari Siavashkolaei, M., Sharifi, A.R. & Karimaei Tbarestani, M., 2021, **Analysis of the Efficiency of Remote Sensing Data for Estimation of Water Balance Components (Case Study: Tajan Catchment, Mazandaran Province)**, JGST, 11(1), PP. 161-175, <http://jgst.issgeac.ir/article-1-1027-fa.html>.
- Biswal, T., 2022, **Climate Change and Its Impact on Soil Fertility and Life Forms**, In Research Anthology on Environmental and Societal Impacts of Climate Change, PP. 1229-1255.
- Boluwade, A., Stadnyk, T., Fortin, V. & Roy, G., 2017, **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, 14, PP. 10-22, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.10.005>.
- Brocca, L., Filippucci, P., Hahn, S., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., Schüller, L., Bojkov, B. & Wagner, W., 2019, **SM2RAIN-ASCAT (2007-2018): Global daily Satellite Rainfall Data from ASCAT Soil Moisture Observations**, Earth System Science Data, 11, PP. 1583-1601, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1583-2019>.
- Chen, H. & Wen, D., 2023, **Dependency of Errors for Four Global Reanalysis and Satellite Precipitation Estimates on Four Crucial Factors**, Atmospheric Research, 296, PP. 107076, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107076>.
- Dehaghani, A.M., Gohari, A., Zareian, M.J. & Haghighi, A.T., 2023, **A Comprehensive Evaluation of the Satellite Precipitation Products Across Iran**, Journal of Hydrology: Regional Studies, 46, P. 101360, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101360>.
- Dhungana, S., Shrestha, S., Van, T.P., Kc, S., Das Gupta, A. & Nguyen, T.P.L., 2023, **Evaluation of Gridded Precipitation Products in the Selected Sub-Basins of Lower Mekong River Basin**, Theoretical and Applied Climatology, 151(1), PP. 293-310, <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04268-1>.
- Dollan, I.J., Maina, F.Z., Kumar, S.V., Nikolopoulos, E.I. & Maggioni, V., 2024, **An Assessment of Gridded Precipitation Products over High Mountain Asia**, Journal of Hydrology: Regional Studies, 52, P. 101675, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101675>.
- ارزیابی و معیار همبستگی، عملکردی بهتر از چهار محصول دیگر داشته است. در نهایت، پیشنهاد می‌شود برای ارزیابی و تحلیل بارش در استان مازندران، به‌ویژه نیمه شرقی آن و مطالعات در حوزه برآورد بارش، محصول IMERG در اولویت استفاده قرار گیرد. به‌کاربردن ابزارها و روش‌های نوین، مانند سامانه‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های ترکیبی، راهکاری برای برآورد بارش به‌شمار می‌رود و نشان‌دهنده پیشرفت‌های علمی در این حوزه است. نتایج ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای، به‌ویژه برتری IMERG در معیارهای گوناگون، بر کارایی این محصول تأکید دارد و این نکته را می‌توان راهنمای محققان و تصمیم‌گیرندگان در مطالعات آب‌وهوایی و هیدرولوژیکی دانست. اما چالش‌های توپوگرافی و تأثیر آن در دقت اندازه‌گیری بارش، به‌ویژه در نواحی دارای اختلاف ارتفاع زیاد، نکته‌ای اساسی است که در مطالعات آینده باید مد نظر قرار گیرد. اشاره به تفاوت دقت مکانی محصولات و تأثیر آن در برآورد بارش نیز نشان‌دهنده نیاز به بهبود روش‌ها و ابزارهای کنونی است.

۵- منابع

- Aksu, H. & Akgül, M.A., 2020, **Performance Evaluation of CHIRPS Satellite Precipitation Estimates over Turkey**, Theoretical and Applied Climatology, 142, PP. 71-84, <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., 2015, **PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies**, Bulletin of the American Meteorological Society, 96, PP. 69-83, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>.
- Bai, X., Shen, W., Wu, X. & Wang, P., 2020, **Applicability of Long-Term Satellite-Based Precipitation Products for Drought Indices Considering Global Warming**, Journal of Environmental Management, 255, P. 109846, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109846>.

- Du, Y., Wang, D., Zhu, J., Lin, Z. & Zhong, Y., 2022, **Intercomparison of Multiple High-Resolution Precipitation Products over China: Climatology and Extremes**, Atmospheric Research, 278, P. 106342, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106342>.
- Et-Takaouy, C., Aqnouy, M., Boukholla, A. & Stitou El Messari, J.E., 2024, **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. 1-22, <https://doi.org/10.1007/s42990-024-00119-5>.
- Farsadnia, F., Rostami Kamrod, M. & Moghadam Nia, A., 2012, **Rainfall Trend Analysis of Mazandaran Province Using Regional Mann-Kendall Test**, Iran-Water Resources Research, 8(2), PP. 60-70.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., ... et al., 2015, **The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations-A New Environmental Record for Monitoring Extremes**, Scientific Data, 2, P. 150066, <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- Ghorbanian, A., Mohammadzadeh, A., Jamali, S. & Duan, Z., 2022, **Performance Evaluation of Six Gridded Precipitation Products throughout Iran Using Ground Observations over the Last Two Decades (2000-2020)**, Remote Sensing, 14(15), P. 3783, <https://doi.org/10.3390/rs14153783>.
- Gu, L., Yin, J., Wang, S., Chen, J., Qin, H., Yan, X., Zhang, Y. & Zhao, T., 2023, **How Well Do the Multi-Satellite and Atmospheric Reanalysis Products Perform in Hydrological Modelling**, Journal of Hydrology, 617, P. 128920, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128920>.
- Guo, B., Xu, T., Yang, Q., Zhang, J., Dai, Z., Deng, Y. & Zou, J., 2023, **Multiple Spatial and Temporal Scales Evaluation of Eight Satellite Precipitation Products in a Mountainous Catchment of South China**, Remote Sensing, 15(5), P. 1373, <https://doi.org/10.3390/rs15051373>.
- Gyasi-Agyei, Y., 2020, **Identification of the Optimum Rain Gauge Network Density for Hydrological Modelling Based on Radar Rainfall Analysis**, Water, 12(7), P. 1906, <https://doi.org/10.3390/w12071906>.
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P. & Yoo, S., 2015, **NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG)**, In Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 4.5; 2015, Available online: https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V4.5.pdf (accessed on 1 December 2021).
- Hussein, A.A. & Baylar, A., 2023, **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), 3(01), PP. 41-60, <https://doi.org/10.55529/jecnam.31.41.60>.
- Joyce, R.J. & Xie, P., 2011, **Kalman Filter-Based CMORPH**, Journal of Hydrometeorology, 12, PP. 1547-1563, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-022.1>.
- Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A. & 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, 2004(5), PP. 487-503, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005%3C0487:CAMTPG%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005%3C0487:CAMTPG%3E2.0.CO;2).
- Keikhosravi-Kiany, M.S., Masoodian, S.A. & Balling Jr., R.C., 2023, **Reliability of Satellite-Based Precipitation Products in Capturing Extreme Precipitation Indices over Iran**, Advances in Space Research, 71(3), PP. 1451-1472, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.003>.
- Khettouch, A., Hssaisoune, M., Hermans, T., ... et al., 2023, **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, 5(3), PP. 159-175, <https://doi.org/10.1007/s42990-023-00108-0>.
- Khorrami, B., Sahin, O.G. & Gunduz, O., 2024, **Comprehensive Comparison of Different Gridded Precipitation Products over Geographic Regions of Türkiye**, Journal of Applied Remote Sensing, 18(3), PP. 034503-034503, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.18.034503>.

- Kunkel, K.E., Robinson, D.A., Champion, S., Yin, X., Estilow, T. & Frankson, R.M., 2016, **Trends and Extremes in Northern Hemisphere Snow Characteristics**, Current Climate Change Reports, 2, PP. 65-73, <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0036-8>.
- Lai, Y., Tian, J., Kang, W., Gao, C., Hong, W. & He, C., 2022, **Rainfall Estimation from Surface Soil Moisture Using SM2RAIN in Cold Mountainous Areas**, Journal of Hydrology, 606, P. 127430, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127430>.
- Lamontagne, J.R., Barber, C.A. & Vogel, R.M., 2020, **Improved Estimators of Model Performance Efficiency for Skewed Hydrologic Data**, Water Resources Research, 56, P. e2020WR027101, <https://doi.org/10.1029/2020WR027101>.
- Lei, H.J., Li, Y., Gao, Y., Chen, H., Zhang, X. & Wang, G., 2022, **Ground Validation and Error Decomposition for Six State-of-the-Art Satellite Precipitation Products over Mainland China**, Atmospheric Research, 269, P. 106017, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106017>.
- Li, Y., Pang, B., Zheng, Z., Chen, H., Peng, D., Zhu, Z. & Zuo, D., 2023, **Evaluation of Four Satellite Precipitation Products over Mainland China Using Spatial Correlation Analysis**, Remote Sensing, 15(7), P. 1823, <https://doi.org/10.3390/rs15071823>.
- Maggioni, V., Sapiano, M.R. & Adler, R.F., 2016, **Estimating Uncertainties in High-Resolution Satellite Precipitation Products: Systematic or Random Error?**, Journal of Hydrometeorology, 17(4), PP. 1119-1129, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0094.1>.
- Mahmoudi Babolan, S., Nastarani Amoghini, S. & Rasoulzadeh, A., 2022, **Evaluation of Satellite Precipitation Products for Estimating Heavy Precipitation on the Caspian Coast**, Water and Soil Management and Modelling, 2(4), PP. 107-122, <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11147.1102>.
- Meng, C., Mo, X., Liu, S. & Hu, S., 2023, **Improving Near-Real-Time Satellite Precipitation Products through Multistage Modified Schemes**, Atmospheric Research, 292, P. 106875, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106875>.
- Mishra, R.K., 2023, **Fresh Water Availability and Its Global Challenge**, British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies, 4(3), PP. 1-78, <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0208>.
- Moazami, S., Abdollahipour, A., Zakeri Niri, M. & Ashrafi, S.M., 2016, **Hydrological Assessment of Daily Satellite Precipitation Products over a Basin in Iran**, Journal of Hydraulic Structures, 2(2), PP. 35-45, <https://doi.org/10.22055/jhs.2016.12850>.
- Nadi, M. & Yousefi Kebriya, A., 2024, **A Method for Correction of Tropical Rainfall Measuring Mission Satellite Temperature Network in Mazandaran Province**, Iranica Journal of Energy & Environment, 15(1), PP. 100-110, <https://doi.org/10.5829/ijee.2024.15.01.10>.
- Nasseri, M., Schoups, G. & Taheri, M., 2022, **A Spatiotemporal Framework to Calibrate High-Resolution Global Monthly Precipitation Products: An Application to the Urmia Lake Watershed in Iran**, International Journal of Climatology, (4), PP. 2169-2194, <https://doi.org/10.1002/joc.7358>.
- Nguyen, P., Ombadi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Braithwaite, D., Ashouri, H. & Thorstensen, A.R., 2018, **The PERSIANN family of Global Satellite Precipitation Data: A Review and Evaluation of Products**, Hydrology and Earth System Sciences, 22, PP. 5801-5816, <https://doi.org/10.5194/hess-22-5801-2018>.
- Nicholson, S.E. & Klotter, D.A., 2021, **Assessing the Reliability of Satellite and Reanalysis Estimates of Rainfall in Equatorial Africa**, Remote Sensing, 13, P. 3609, <https://doi.org/10.3390/rs13183609>.
- Nozarpour, N., Mahjoobi, E. & Golian, S., 2024, **Assessment of Satellite-Based Precipitation Products in Monthly, Seasonal, and Annual Time-Scale over Iran**, International Journal of Environmental Research, 18(5), P. 76, <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00619-0>.
- Rasoulzadeh, A., Mahmoudi Babolan, S. & Nastarani Amoghini, S., 2022, **Spatio-Temporal Evaluation of Satellite Precipitation Products in Northwestern Iran**, Iranian Journal of Soil and Water Research, 53(9), PP. 2141-2160, <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345392.669311>.
- Rostamzadeh, H., Rasouli, A.A., Vazifeh Doost, M. & Maleki, N., 2020, **Comparative Comparisons of Precipitation Obtained from TRMM, GPM and Doppler Radars with Ground Station Data (Case Study of**

- Surface Wave from October 26 to 28, 2015 in Western Iran**, Journal of Climate Research, 1398(38), PP. 49-61.
- Savina, M., Schäppi, B., Molnar, P., Burlando, P. & Sevruk, B., 2012, **Comparison of a Tipping-Bucket and Electronic Weighing Precipitation Gage for Snowfall**, Atmospheric Research, 103, PP. 45-51, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.06.010>.
- Shabankareh, R.N.T., Ziaee, P. & Abedini, M.J., 2024, **Evaluation of IMERG Precipitation Product over Various Temporal Scales in a Semi-Arid Region of Southern Iran**, Journal of Arid Environments, 220, P. 105102, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105102>.
- Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D., Petersen, W., Huffman, G., Kidd, C., Stocker, E. & Kakar, R., 2018, **The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission's Scientific Achievements and Societal Contributions: Reviewing Four Years of Advanced Rain and Snow Observations**, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144, PP. 27-48, <https://doi.org/10.1002/qj.3313>.
- 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, PP. 79-107, <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>.
- Vijay, P. & Singh, P.D.D.S., 2017, **Handbook of Applied Hydrology**, 2nd ed.; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, <https://doi.org/10.1080/02626666509493376>.
- Xie, P., Joyce, R., Wu, S., Yoo, S.H., Yarosh, Y., Sun, F. & Lin, R., 2017, **Reprocessed, Bias-Corrected CMORPH Global High-Resolution Precipitation Estimates from 1998**, Journal of Hydrometeorology, 18(6), PP. 1617-1641, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0168.1>.
- Xie, Y., Sun, W., Ren, M., Chen, S., Huang, Z. & Pan, X., 2022, **Stacked Ensemble Learning Models for Daily Runoff Prediction Using 1d and 2d Cnn**, <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.421135>.
- Yang, Y., Ji, W., Niu, L., Zheng, Z., Huang, W., Zhang, C., Xu, X., Li, J. & Li, H., 2024a, **Assessing Satellite and Reanalysis-Based Precipitation Products in Cold and Arid Mountainous Regions**, Journal of Hydrology: Regional Studies, 51, P. 101612, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101612>.
- Yang, L., Shi, Z., Liu, R. & Xing, M., 2024b, **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, 130, P. 103888, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103888>.