

Evaluation and Comparison of Satellite Rainfall Products in Mountainous Areas with Lack of Meteorological Data of Lorestan Province

M. Fallahi khoshhi^{1*}, A.R. Karbalaee Doree², Z. Hedjazizadeh³, P. Hamezadeh⁴

1- Researcher, The Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Lorestan Branch, Lorestan, Iran
(*- Corresponding Author Email: mostafa.fallahi67@gmail.com)

2 and 3- Assistant Professor and Professor, Department of Climatology Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran, respectively.

4- Graduate in Water Structures, Faculty of Agriculture, University of Lorestan, Lorestan, Iran

Received: 05-03-2024
Revised: 27-08-2024
Accepted: 31-08-2024
Available Online: 31-08-2024

How to cite this article:

Fallahi khoshhi, M., Karbalaee Doree, A.R., Hedjazizadeh, Z., & Hamezade, P. (2024). Evaluation and comparison of satellite rainfall products in mountainous areas without statistics of Lorestan province. *Journal of Water and Soil*, 38(4), 429-443. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87068.1395>

Introduction

The large temporal and spatial changes of precipitation, especially in mountainous areas, have turned it into a controversial variable in climate models. Measuring precipitation (rain and snow) along with its distribution and changes is very important to improve our understanding of global water cycle and energy, water resources monitoring, hydrological modeling. Lack of reliable data is one of the most important challenges in rainfall analysis. Due to the significant temporal and spatial variability of precipitation in mountainous areas, accurate spatially distributed data is crucial for effective water resource assessment and management. However, many mountainous regions have limited rain gauge stations. Today, satellite products are commonly used to measure precipitation in these areas, but the variability among these products raises concerns about their accuracy in mountainous regions. Additionally, the quality of satellite products differs between various products and across different climatic regions, making it essential to thoroughly evaluate them before use. The purpose of this research was to evaluate the precipitation data of two satellite products (GPM, PERSIAN) and reanalysis data (ECMWF) in the estimation of precipitation in mountainous areas without stations in Lorestan province.

Method

This study utilized rainfall data from 24 synoptic and rain gauge stations across Lorestan province. Emphasis was placed on stations situated in or near mountainous regions. The selected stations were chosen based on their suitable spatial distribution and record length. The rainfall data spanned the period from 2015 to 2021 and included daily, monthly, and annual measurements. To evaluate satellite rainfall algorithms and estimate rainfall in regions with limited data, data from the GPM and PERSIAN satellites were employed, along with ECMWF reanalysis data. The PERSIAN rainfall algorithm is a remote sensing-based method that utilizes artificial neural networks. It calibrates infrared data with passive microwave estimates and converts longwave infrared images into rainfall estimates using a three-step process. The spatial resolution of this product is 0.25° x 0.25°, and it offers hourly, daily, and monthly temporal resolution. The PERSIAN rainfall algorithm data can be accessed from <https://chrsdata.eng.uci.edu>. The GPM mission aims to provide continuous observations of Earth's precipitation. It employs the GPM Microwave Imager (GMI) and Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) to observe both snow and rain. The final product, called IMERG, is generated through multiple runs of the algorithm for each observation time. Initial estimates are quickly provided, and subsequent estimates improve as more information becomes



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87068.1395>

available. The spatial resolution of the GPM product is $1^\circ \times 1^\circ$, and it offers hourly, daily, and monthly temporal resolution. IMERG data can be obtained from <https://gpm.nasa.gov/data>. CMWF reanalysis data is derived from the combination of short-term simulations of numerical weather prediction models with ground-based observational data. These simulations are controlled with observational data, and the resulting reanalysis database provides global coverage from 1979 with a spatial resolution ranging from $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ to 3° . The temporal resolution of ECMWF reanalysis data is hourly, daily, and monthly. More information about ECMWF data can be found at <https://www.ecmwf.int/> (Azizi, 2019). To evaluate the accuracy of the products, R-squared correlation (R^2), root mean square error (RMSE), standard deviation (MAD), correlation coefficient (R), error deviation (MBE) and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) were used. Also, the probability of detection (POD), false alarm ratio (FAR), and critical success index (CSI) indices were used to validate the data.

Results

The results showed that none of the three products are suitable for estimating daily precipitation in mountainous areas. However, on a monthly scale, these products provide reasonable estimates. Among the three, the GPM satellite product demonstrated better accuracy on a monthly scale, based on error levels and the spatial distribution of estimated precipitation. On an annual scale, GPM also performed best, as indicated by both statistical errors and the spatial patterns of average annual precipitation. According to the MBE index, on daily and monthly scales, the ECMWF product tended to overestimate precipitation, while the PERSIANN and GPM products underestimated it. On an annual scale, GPM and ECMWF products overestimated precipitation, whereas PERSIANN underestimated it.

Keywords: ECMWF, GPM, Mountain, PERSIAN, Precipitation, Satellite

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۳، ص. ۴۲۹-۴۴۳

ارزیابی و مقایسه محصولات بارش ماهواره‌ای در مناطق کوهستانی فاقد آمار هواشناسی استان لرستان

مصطفی فلاحی خوشحی^{۱*} - علیرضا کربلانی درئی^۲ - زهراجازی زاده^۳ - پرستو همه زاده^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

چکیده

اندازه‌گیری بارش همراه با توزیع و تغییرات زمانی-مکانی آن برای بهبود درک ما از چرخه آب، نظارت بر منابع آب و مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی مهم است. کمبود داده‌های قابل‌اعتماد به‌خصوص در مناطق کوهستانی یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در اندازه‌گیری بارش است. امروزه محصولات ماهواره‌ای به‌عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری بارش در این مناطق مورد استفاده قرار می‌گیرند اما اختلاف بین محصولات موجود دقت آن‌ها را برای مناطق کوهستانی به چالش می‌کشد، بنابراین ارزیابی کامل محصولات ماهواره‌ای قبل از کاربرد آن‌ها ضرورت دارد. هدف از این تحقیق، ارزیابی داده‌های بارش دو محصول ماهواره‌ای (GPM, PERSIAN) و داده‌های بازکاوی (ECMWF) در برآورد بارش در مناطق کوهستانی فاقد ایستگاه در استان لرستان است. برای ارزیابی دقت محصولات از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAD)، ضریب همبستگی (CORR)، انحراف خطا (MBE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد. همچنین برای اعتبارسنجی داده‌ها از شاخص‌های احتمال آشکارسازی (POD)، نسبت هشدار اشتباه (FAR)، شاخص موفقیت بحرانی (CSI) استفاده شد. نتایج نشان داد که هیچ‌یک از سه محصول نماینده مناسبی برای برآورد بارش در مقیاس روزانه در مناطق کوهستانی نیستند. در مقیاس ماهانه این محصولات نتایج مطلوبی برای برآورد بارش ارائه می‌دهند. از بین سه محصول، با داده‌های مختلف، محصول ماهواره GPM با توجه به میزان خطاها و همچنین الگوی مکانی بارش تخمین زده‌شده، از دقت بهتری در مقیاس ماهانه برخوردار است. در مقیاس سالانه نیز با توجه به مقدار خطاهای آماری و همچنین الگوهای مکانی میانگین بارش سالانه، ماهواره‌ی GPM عملکرد بهتری در برآورد مقدار بارش را نشان داد. همچنین با توجه به نتایج شاخص MBE در مقیاس روزانه و ماهانه محصولات ECMWF بیش برآورد و محصولات PERSIAN و GPM کم برآورد در تخمین بارش هستند. در مقیاس سالانه محصولات GPM و ECMWF بیش برآورد و محصولات PERSIAN کم برآورد هستند.

واژه‌های کلیدی: بارش، کوهستان، GPM، ECMWF، PERSIAN

مقدمه

بارش یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژیکی زمین است و

تأثیرات زیادی بر جان و دارایی انسان دارد (Vasavi et al., 2022). بارش، مهم‌ترین و مؤثرترین منبع آب یک حوزه آبخیز است که از نظر زمانی و مکانی دارای تنوع قابل‌توجهی است و اغلب توزیع نامنظم و ناهمگن از خود نشان می‌دهد (Wang et al., 2020). برآورد و اندازه‌گیری دقیق بارش پیش‌نیاز توسعه پایدار در زمینه‌های اقتصادی، کشاورزی، اکولوژیکی و اجتماعی است (Tan et al., 2018). علاوه بر این، بارش مهم‌ترین داده ورودی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی رواناب است (Zeng et al., 2018). حوزه‌های آبخیز کوهستانی به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات آب‌وهوایی از اهمیت ویژه‌ای

۱- پژوهشگر جهاد دانشگاهی، واحد لرستان، لرستان، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: mostafa.fallahi677@gmail.com)

۲ و ۳- به‌ترتیب استادیار و استاد، آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۴- دانش‌آموخته سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87068.1395>

و TRMM3B43v7 پرداخته و نتایج آن‌ها بیانگر عملکرد مطلوب هر دو محصول در نواحی ارتفاعات غربی حوضه و عملکرد ضعیف‌تر در نواحی شرقی است. نتایج مطالعه پائولو و همکاران (Paolo et al., 2022) نشان داد که تخمین‌های خوبی از بارندگی از ماهواره Sentinel-1 با در نظر گرفتن گام‌های زمان تجمع بیشتر از ۲۰ روز قابل دست‌یابی است. برتومیر و اسپرسو (Berthomier & Espresso, 2023) یک مدل یادگیری عمیق را ارائه کردند که برای تخمین بارش از مشاهدات ماهواره‌ای در مقیاس جهانی طراحی شده است. مطالعه دژنه و همکاران (Dejene et al., 2023) بیانگر عملکرد مناسب مدل ماهواره‌ی CHIRPS در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه و قابلیت تشخیص خشک‌سالی است. نتایج ترکیب روش‌های درون‌یابی و محصولات بارش ماهواره‌ی TRMM در مطالعه یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2021) حاکی از برتری روش گرادیان ۴ بعدی در تخمین مکانی بارش در استان مازندران بوده است. سیفی کبریایی و همکاران (Seifi Kobriya et al., 2021) با اصلاح شبکه ماهواره‌ی (TRMM) با استفاده از روش گرادیان چهاربعدی نشان دادند که اصلاح شبکه TRMM سبب افزایش ۳۰-۵۰ درصد دقت این ماهواره شده است. نتایج مطالعه‌ی خان محمدی و همکاران (Khanmohammadi et al., 2022) در حوزه آبخیز نیشابور نشان داد که سه محصول ماهواره‌ی IMERG از نوع Near Real Time، 3B42RT-7 از نوع Real Time و PERSIAN-CDR از نوع Final Run در مقیاس روزانه مناسب نیستند ولی در مقیاس ماهانه عملکرد بهتری را نشان دادند. از دیگر مطالعات می‌توان به مطالعات (Tafte et al., 2019; Abdulahipour et al., 2020; Lu et al., 2023; Huffman et al., 2023; Talchabhadel et al., 2021; Kubota et al., 2020; Chen et al., 2020; Gao et al., 2020) اشاره کرد. بررسی منابع نشان داد که تا به حال عملکرد این محصولات در مناطق کوهستانی استان لرستان ارزیابی نشده و مطالعات پیشین به صورت ایستگاهی، محدود و در ارتفاعات پایین مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی دو محصول ماهواره‌ی (GPM و PERSIAN) و داده‌های بازکای (ECMWF) در برآورد بارش از طریق مقایسه با داده‌های زمینی در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه در مناطق کوهستانی فاقد ایستگاه در استان لرستان است.

روش تحقیق

در پژوهش حاضر داده‌های بارش ۲۴ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی با پراکنش و طول دوره‌ی آماری مناسب در سطح استان لرستان با تأکید بر ایستگاه‌های مستقر و یا نزدیک به مناطق کوهستانی انتخاب شد (جدول ۱ و شکل ۱). از داده‌های بارش

برخوردارند (Panthi et al., 2015). به واسطه شرایط خاص این مناطق، از جمله شیب‌های تند، توپوگرافی ناهموار، صعب‌العبور بودن و عدم امکان دسترسی مطلوب و عدم استقرار نیروی انسانی و محدودیت‌های فنی و اقتصادی، شرایط استقرار شبکه پایش مناسب بارش در این حوضه‌ها فراهم نیست (Ruan et al., 2017). در کنار ایستگاه‌های سینوپتیک در اکثر مناطق ایران شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی به‌طور فشرده‌تری بارش را اندازه‌گیری می‌کنند ولی با این‌وجود به دلیل تنوع مکانی و زمانی زیاد بارش و به‌ویژه تغییرپذیری آن در اقلیم‌های متفاوت، محققان غالباً در تهیه نقشه‌های بارش با مشکلاتی به‌ویژه در مناطق کوهستانی مواجه می‌شوند (Ghairi Sara & Yazdan Panah, 2013). در سال‌های اخیر، روش‌های برآورد بارش با استفاده از محصولات ماهواره‌ای در مقیاس جهانی و با وضوح زمانی و مکانی بالا به‌عنوان جایگزینی برای داده‌های زمینی توسعه یافته است (Jiang et al., 2016). مزیت بررسی بارندگی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور، شناخت بهتر پدیده بارش و پارامترهای مؤثر بر آن، در یک گستره مکانی وسیع است (Shokri Kochach, 2020). محصولات بارشی مبتنی بر ماهواره، قادرند به‌طور مؤثر برآورد بارش را به مناطقی که با کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری متداول یا توزیع ناهمگون و نامنظم آن‌ها مواجه هستند، گسترش دهند (Khanmohammadi et al., 2022)؛ اما دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت است و امروزه با اطمینان در مورد صحیح بودن اطلاعات بارش ماهواره‌ای خاص، نمی‌توان اظهارنظر کرد. بنابراین در چنین شرایطی بررسی دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای موجود در مناطق مختلف، یکی از نیازهای تحقیقاتی است.

در نواحی کوهستانی استان لرستان به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و یا جغرافیایی، ایستگاه‌های هواشناسی دارای تراکم پائینی هستند و استفاده از داده‌های این ایستگاه‌ها در سطح استان با محدودیت همراه است. همچنین بیشتر ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی استان در ارتفاعات پایین‌تر از ۲۰۰۰ متر قرار دارند، درحالی‌که مساحت زیادی از استان در ارتفاع بالاتر از ۲۰۰۰ متری قرار دارد. این امر باعث شده است که اطلاعات دقیقی از توزیع و تغییرات زمانی-مکانی بارش در ارتفاعات بالاتر از ۲۰۰۰ در استان لرستان وجود نداشته باشد. در سال‌های اخیر، محققین زیادی به بررسی محصولات بارش ماهواره‌ای در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف پرداخته‌اند: وی و همکاران (Wei et al., 2020) قابلیت پایش خشک‌سالی به‌وسیله تخمین‌های بارش ماهواره‌ای را مورد تأیید قرار دادند. تای و همکاران (Taye et al., 2020) خشک‌سالی هواشناسی را در حوضه آبی نیل با استفاده از محصولات بارندگی ماهواره‌ای بررسی کردند. آدان (Adane et al., 2021) به ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ی PERSIAN-CDR

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی دقت برآورد بارش هر یک از محصولات از آمارهای ضریب تعیین^۴ (R)، جذر میانگین مربع خطا^۵ (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا^۶ (MAD)، ضریب همبستگی^۷ (CORR)، انحراف خطا^۸ (MBE) و ضریب نش-سانکلیف^۹ (NSE) استفاده شد. برای محاسبه این شاخص‌ها از روابط زیر استفاده شد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{o_i} - \bar{X}_o)(X_{s_i} - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{o_i} - \bar{X}_o)^2 \sum_{i=1}^N (X_{s_i} - \bar{X}_s)^2}}$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^N |X_{o_i} - X_{s_i}|}{N}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{o_i} - X_{s_i})^2}{N}}$$

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^T (P_i^{obs} - P_i^{est})}{\sum_{i=1}^T P_i^{obs}} \times 100$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{o_i} - X_{s_i})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{o_i} - \bar{X}_o)^2}$$

در روابط فوق X_o داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{X}_o میانگین داده‌های مشاهداتی، N تعداد داده‌ها، P_i^{obs} و P_i^{est} به ترتیب بارش مشاهداتی و ماهواره‌ی، t گام زمانی و T طول کل سری زمانی.

اعتبارسنجی مدل

برای صحت‌سنجی نتایج محاسباتی از شاخص‌های مطابقت، شامل احتمال آشکارسازی (POD^{10})، نسبت هشدار اشتباه (FAR^{11})، شاخص موفقیت بحرانی (CSI^{12}) استفاده شد. طبق تعریف، شاخص POD نسبت تعداد برآوردهای صحیح داده‌ها به کل بارندگی‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌ها است و مقدار POD برابر با ۱ بیانگر تخمین درست نقاط بارانی توسط ماهواره است. شاخص FAR نسبت پیش‌بینی نادرست به تعداد کل پیش‌بینی‌ها است و مقدار آن بین صفر

(روزانه، ماهانه و سالانه) ماهواره‌های GPM و PERSIAN و داده‌های بازکاوی (ECMWF) (دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۱) و ایستگاه‌های هم‌مدیدی و باران‌سنجی (دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۱) در سطح استان لرستان برای ارزیابی الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای و برآورد مقدار بارش در مناطق فاقد آمار استفاده گردید.

الگوریتم بارش PERSIAN: مدل PERSIAN^۱ یک الگوریتم تخمین بارندگی با استفاده از سنجش‌ازدور با به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی است. رویکرد این الگوریتم، واسنجی داده‌های مادون‌قرمز با برآوردهای میکروویوهای غیرفعال است و در سه مرحله تصاویر مادون‌قرمز با طول موج بلند را به تخمین بارندگی تبدیل می‌کند. این محصول با تفکیک مکانی 0.25×0.25 درجه و تفکیک زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه بین ۶۰ درجه جنوبی و شمالی از تارنمای [eduhttps://chrsdata.eng.uci.edu](https://chrsdata.eng.uci.edu) قابل دریافت است.

الگوریتم بارش GPM: سنجش جهانی بارندگی که به‌اختصار GPM^۲ نامیده می‌شود، هدف آن دیده‌بانی پیوسته بارندگی زمین است (NASA, 2016; Hou et al., 2014). این ماهواره، با استفاده از ابزار تصویربرداری ماکروویو (GMI) و رادار بارش دو فرکانسه (DPR)، می‌تواند بارش برف و باران را مشاهده کرده و محصول نهایی آن (IMERG) نام دارد. این الگوریتم چندین بار برای هر زمان مشاهده‌ای اجرا می‌شود، ابتدا یک تخمین سریع می‌زند و با رسیدن اطلاعات بیشتر، پی‌درپی تخمین‌های بهتری ارائه می‌دهد (Huffman et al., 2015). این محصول دارای تفکیک مکانی 0.1×0.1 درجه و تفکیک زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه است و از تارنمای [v/datahttps://gpm.nasa.gov](https://gpm.nasa.gov/data/v/) قابل دریافت است.

داده‌های بازکاوی ECMWF: داده‌های باز تحلیل‌شده مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی (ECMWF^۳) از ترکیب نتایج شبیه‌سازی‌های کوتاه‌مدت مدل‌های شبیه‌سازی عددی وضع هوا با داده‌های مشاهداتی زمینی، به‌دست می‌آیند. این شبیه‌سازی اولیه با داده‌های مشاهده‌ی کنترل می‌شوند. داده‌های پایگاه اطلاعاتی ECMWF از سال ۱۹۷۹ با پوشش سراسری ۶۰ درجه شمالی و جنوبی، تفکیک مکانی 0.125×0.125 تا ۳ درجه و در مقیاس زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه در دسترس می‌باشند (Azizi, 2019). داده‌های بازکاوی ECMWF از تارنمای <https://www.ecmwf.int> قابل دریافت است.

- 4- R-squared correlation (R²)
- 5- Root Mean Square Error (RMSE)
- 6- Mean Absolute Deviation (MAD)
- 7- Correlation Coefficient (R)
- 8- Mean Bias Error (MBE)
- 9- Nash-Sutcliffe Coefficient (NSE)
- 10- Probability of Detection
- 11- False Alarm Ratio
- 12- Critical Success Index

- 1- Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks
- 2- Global Precipitation Measurement
- 3- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

بازه ضرایب ۳/۲ تا ۹/۱ قرار می‌گیرد. در بسیاری از ایستگاه‌ها نتایج شاخص‌های آماری، دقت کافی را نشان نمی‌دهند، همچنین میزان همبستگی پیرسون در ایستگاه‌های مورد مطالعه پایین است. نتایج شاخص همبستگی در داده‌های ECMWF تا حدودی همبستگی بالایی را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب نش سائکلیف نیز عملکردهای پایین این سه محصول در منطقه (در مقیاس روزانه) را نشان می‌دهد (شکل ۲).

بر اساس شاخص‌های آماری کمترین مقدار خطای RMSE و MAD به ترتیب مربوط به محصولات ECMWF، PERSIAN و GPM است. بررسی ضریب همبستگی نشان داد که بیشترین ضریب همبستگی با مقدار ۰/۵۲ مربوط به محصولات ECMWF است در این محصولات بیشترین ضریب همبستگی در ایستگاه‌های سینوپتیک مشاهده شد و نشان داد که داده‌های ECMWF در ایستگاه‌های سینوپتیک نسبت به ایستگاه‌های باران‌سنجی همبستگی بالاتر دارند. در محصولات PERSIAN میانگین ضریب همبستگی ۰/۳۳ است و محصولات این ماهواره بیشتر با داده‌های باران‌سنجی همبستگی بهتری نشان می‌دهند. بین محصولات GPM و داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی ارتباطی مشاهده نشد اما با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک همبستگی پایینی (به‌طور میانگین ۰/۲۰) نشان داد. مقادیر MBE برای دو محصول ماهواره‌ای PERSIAN و GPM منفی است که نشان می‌دهد این دو محصول مقدار بارندگی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند؛ اما مقدار مثبت MBE در مدل ECMWF نشان می‌دهد که محصولات این ماهواره مقدار بارندگی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است، به‌صورت کلی محصولات ECMWF در مقیاس روزانه دارای اعتبار بیشتری است (جدول ۲).

۱ و متغیر است و مقادیر کمتر آن بیانگر دقت بیشتر ماهواره است. شاخص CSI دقت نسبی ماهواره را تعیین می‌کند. این شاخص، هم به پیش‌بینی‌های نادرست و هم به رویدادهای ازدست‌رفته حساس است. برای محاسبه این شاخص‌ها از روابط زیر استفاده شد. در روابط فوق H تعداد پیش‌بینی‌هایی می‌باشد که در هر دو روش مقدار بارندگی ثبت‌شده است، F تعداد پیش‌بینی‌هایی است که فقط ماهواره مقدار بارندگی را ثبت کرده است. مقدار M تعداد پیش‌بینی‌هایی است که علی‌رغم وقوع بارندگی در ایستگاه زمینی، مقدار آن در ماهواره مورد نظر ثبت‌نشده است (Wilks, 2011).

$$POD = \frac{H}{H+M}$$

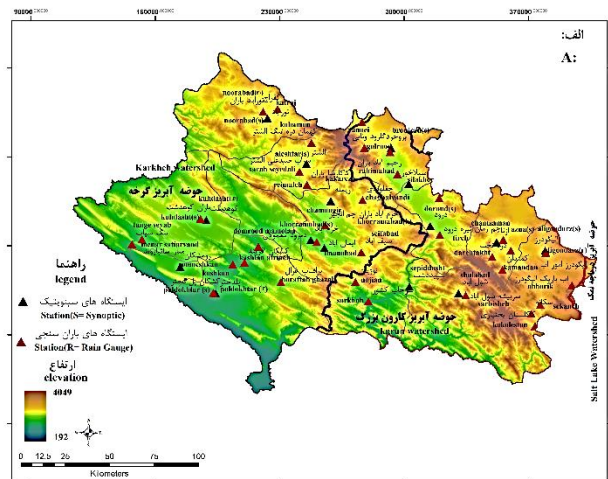
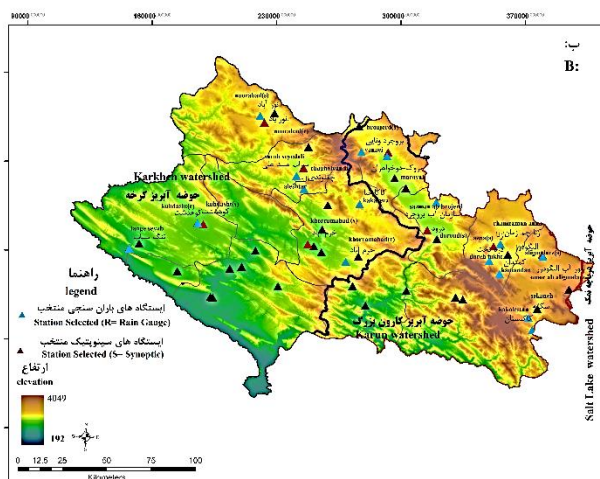
$$FAR = \frac{F}{F+H}$$

$$CSI = \frac{H}{H+F+M}$$

نتایج و بحث

ارزیابی و مقایسه بارش روزانه محصولات ماهواره‌ای

با توجه به هدف اصلی این مطالعه که بررسی میزان بارش برآورد شده با استفاده از دو محصول ماهواره GPM و PERSIAN و داده‌های بازکاوی ECMWF در مقایسه با داده‌های مشاهداتی است، نتایج به‌صورت بررسی‌های روزانه، ماهانه و سالانه بطور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در شکل ۲ شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ای بر اساس بازه زمانی روزانه محاسبه شده است. بر اساس شاخص‌های آماری مندرج در شکل ۲ محصولات ماهواره‌های PERSIAN، ECMWF، GPM از دقت بالایی برای برآورد بارش روزانه برخوردار نیستند. در مقیاس روزانه شاخص RMSE



شکل ۱- الف: موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی استان لرستان. ب: ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی منتخب

Figure 1- A: Location of synoptic and rain gauge stations in Lorestan province. B: Selected synoptic and rain gauge stations

جدول ۱- موقعیت و مشخصات ایستگاه‌های منتخب
Table 1- Location and characteristics of selected stations

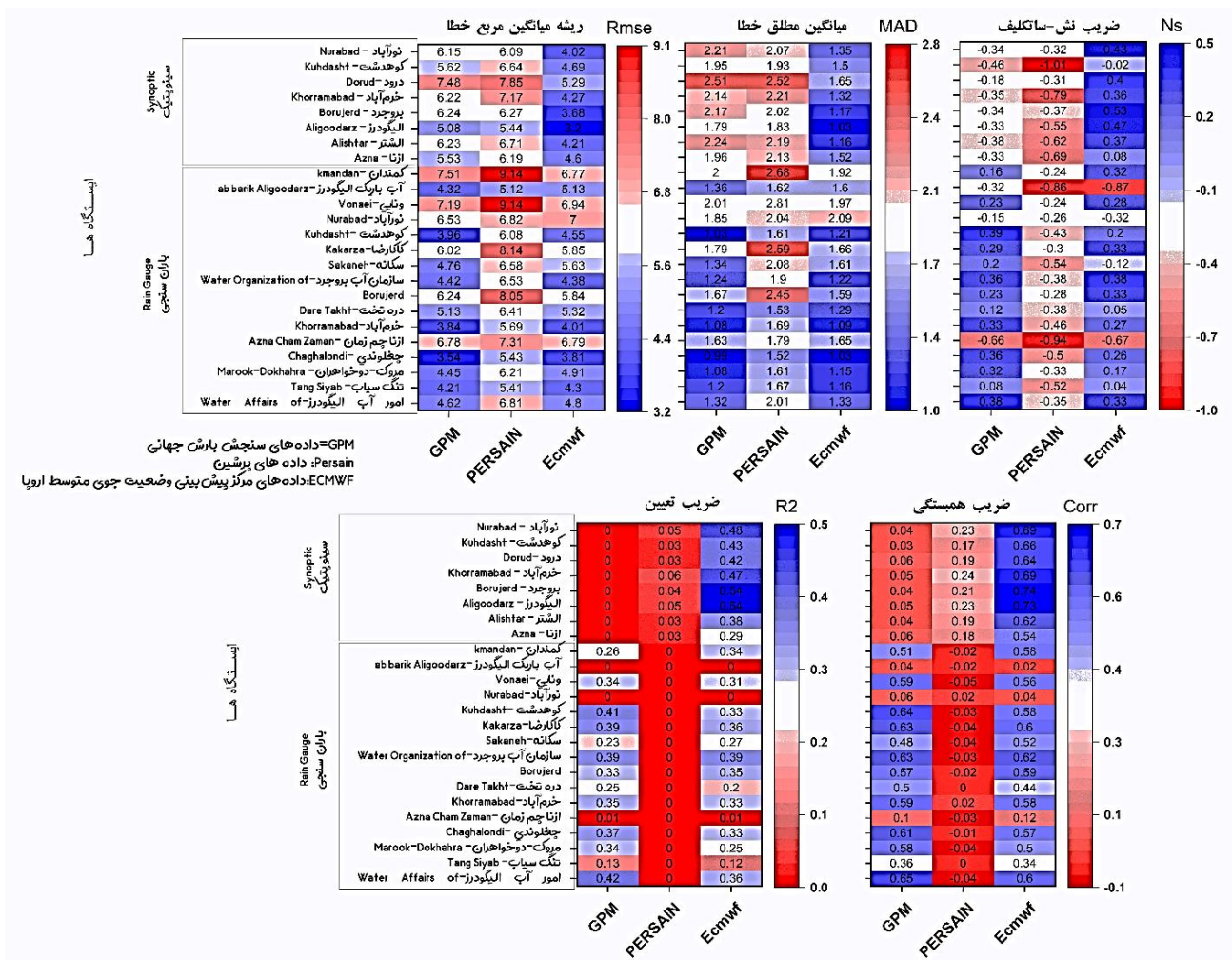
ایستگاه	ارتفاع	طول	عرض	ایستگاه	ارتفاع	طول	عرض
س=سینوپتیک/ر=باران سنجی Station(S= Synoptic) (R= Rain Gauge)	Elevation	جغرافیایی Longitude	جغرافیایی Latitude	س=سینوپتیک/ر=باران سنجی Station(S= Synoptic) (R= Rain Gauge)	Elevation	جغرافیایی Longitude	جغرافیایی Latitude
الیگودرز (سینوپتیک) Aligoodarz (S)	2022.1	379349	3697282	خرم‌آباد (باران سنجی) Khorramabad (R)	1291	255532	3711512
کوهدشت (سینوپتیک) Kuhdasht (S)	1197.8	188645	3714463	سرآب صید علی (باران سنجی) Saraab Seyed Ali (R)	1570	241113	3741658
الشتر (سینوپتیک) Aleshtar (S)	1567.1	245048	3746135	چغلوئندی (باران سنجی) Chaghalvandi (R)	1680	276623	3725791
دروود (سینوپتیک) Doroud (S)	1522.3	314677	3711119	کاکارضا (باران سنجی) Kakareza(R)	1531	245357	3734410
ازنا (سینوپتیک) Azna (S)	1871.8	352034	3702000	تنگ سیاب (باران سنجی) TangSiyab (R)	883	705051	3696607
نورآباد (سینوپتیک) Noorabad (Lorestan)(S)	1859	223071	3771761	نورآباد (باران سنجی) Noorabad(R)	1790	774256	377586
بروجرد (سینوپتیک) Boroujerd(S)	1629	292683	3754995	کاکلستان (باران سنجی) Kakolestan(R)	1800	373753	3654893
خرم‌آباد (سینوپتیک) Khorramabad(S)	1147.8	247472	3703244	سکانه (باران سنجی) Sakaneh(R)	1900	371573	3661821
کوهدشت (باران سنجی) Kuhdasht(R)	1197	742716	3713130	سازمان آب بروجرد (باران سنجی) Water Organization of Borujerd (R)	1576	292099	3752746
کماندان (باران سنجی) Kamandan(R)	2025	355326	3686572	مروک-دوخواهران (باران سنجی) Marovak-Dokhahran(R)	1570	319806	3726830
دره تخت (باران سنجی) Dare Takht(R)	1870	349561	3693832	ونایی (باران سنجی) Vonaei(R)	1970	277631	3755113
امور آب الیگودرز (باران سنجی) Water Affairs of Aligoodarz (R)	2010	379740	3696149	ازنا چم زمان (باران سنجی) Azna Cham Zaman(R)	1874	355790	3703396

برآوردها را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج شاخص‌های آماری محصولات از دقت کافی برای برآورد بارش در مقیاس ماهانه برخوردار هستند. ضریب همبستگی در اکثر ایستگاه‌ها بالای ۹۰ درصد است. در محصولات PERSIAN بالاترین مقدار همبستگی در ایستگاه‌های خرم‌آباد و درود و کاکا رضا (میانگین ۹۵ درصد) و کمترین مقدار ضریب همبستگی در ایستگاه‌های آب باریک الیگودرز و نورآباد و کماندان (میانگین ۵۷ درصد) مشاهده شد. در محصولات GPM بالاترین مقدار همبستگی در ایستگاه‌های ازنا، بروجرد، خرم‌آباد، درود و کاکا رضا (میانگین ۹۸ درصد) و کمترین مقدار ضریب همبستگی در ایستگاه‌های آب باریک الیگودرز و نورآباد (میانگین ۷۳ درصد) مشاهده شد. در محصولات ECMWF بالاترین مقدار همبستگی در ایستگاه‌های ازنا، بروجرد، خرم‌آباد، درود و کاکا رضا (میانگین ۹۶ درصد) و کمترین مقدار ضریب همبستگی در ایستگاه‌های آب باریک الیگودرز و نورآباد (میانگین ۷۲ درصد) مشاهده شد. میزان ضریب تعیین نیز در اکثر ایستگاه‌ها بالای ۹۰ درصد است که نشان می‌دهد محصولات ماهواره‌ی دارای دقت لازم می‌باشند (شکل ۳). در مقیاس ماهانه داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک نسبت به داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی همبستگی بهتری با داده‌های ماهواره‌ی نشان می‌دهند.

برای تعیین محدودیت تشخیص بارش از طریق الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای، سه شاخص POD، FAR، CSI در مقیاس روزانه در ایستگاه‌ها بررسی گردید. با توجه به نتایج آماره POD محصولات ماهواره‌ی ECMWF با (POD=0.34) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ی: GPM با (POD=0.15) و PERSIAN با (POD=0.23) بارش را دقیق‌تر تخمین می‌زند. همچنین آماره FAR که کسری از رخدادهایی را نشان می‌دهد که ماهواره به اشتباه بارندگی را تشخیص داده و در واقعیت بارندگی رخ نداده است، نشان داد که محصولات ماهواره‌ی ECMWF با (FAR =0.63) نسبت به سایر محصولات GPM (FAR =0.78) و PERSIAN با (FAR=0.69) دارای بیش‌بینی بارندگی‌های غیرواقعی کمتری است (جدول ۲).

ارزیابی و مقایسه بارش محصولات ماهواره‌ی در مقیاس ماهانه

در مقیاس ماهانه برای ارزیابی داده‌ها در گام نخست مجموع بارش هر ماه از داده‌های روزانه محاسبه شد. بررسی شاخص‌های آماری در مقیاس ماهانه نشان داد که در هر سه محصول میزان خطا به میزان قابل‌توجهی کاهش پیدا کرده است و مدل‌ها دقت کافی در



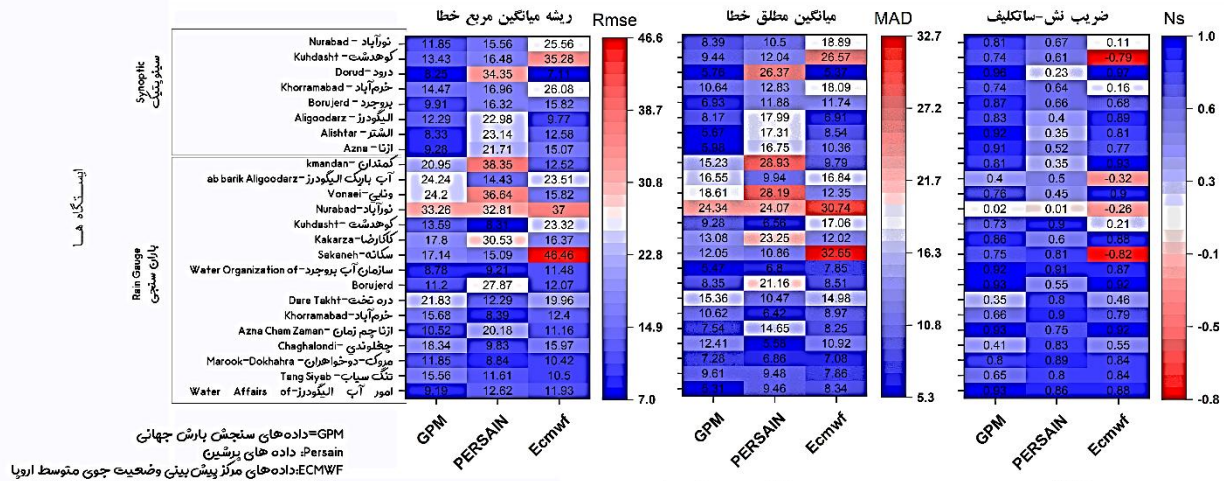
شکل ۲- محاسبه شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ای در مقیاس روزانه
Figure 2- Calculation of statistical indicators of satellite products on a daily scale

جدول ۲- مقایسه میانگین شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ای در مقیاس روزانه
Table 2- Comparison of average statistical indicators of satellite products on a daily scale

روزانه Daily	میانگین مطلق خطا MAD	ریشه میانگین مربع خطا RMSE	ضریب همبستگی r(XY)	ضریب نش-ساتکیف NSE	ضریب تعیین R ²	انحراف خطا MBE	نسبت هشدار اشتباه POD	نسبت هشدار اشتباه FAR	شاخص موفقیت بحرانی CSI
داده‌های سنجش بارش جهانی GPM	2.02	6.76	0.05	0.49-	0.01	0.69-	0.15	0.78	0.17
داده‌های پرشین PERSIAN	1.66	5.5	0.33	0.02-	0.18	0.54-	0.23	0.69	0.21
داده‌های مرکز پیش‌بینی وضعیت جوی متوسط اروپا ECMWF	1.43	5	0.52	0.15	0.31	0.49	0.34	0.63	0.24

اعتبار بیشتری هستند (جدول ۳). در مقیاس ماهانه مقادیر MBE برای دو مدل GPM و PERSIAN منفی است (به ترتیب ۱۰- و ۱۴/۱-) که نشان می‌دهد این دو مدل مقدار بارندگی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده اند؛ اما مقدار MBE در مدل ECMWF مثبت (۱۳/۲) است که نشان می‌دهد محصولات این ماهواره مقدار بارندگی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است، (جدول ۳ و شکل ۴).

بر اساس میانگین شاخص‌های آماری کمترین مقدار خطای MAD و RMSE مربوط به محصولات پایگاه داده‌های GPM و در مرحله بعد مربوط به محصولات ECMWF و PERSIAN است. بیشترین میزان میانگین همبستگی (R) به ترتیب با مقدار (۰/۹۵: PERSIAN, ECMWF, GPM) مربوط به محصولات GPM است؛ بنابراین محصولات GPM نسبت به سایر محصولات دارای

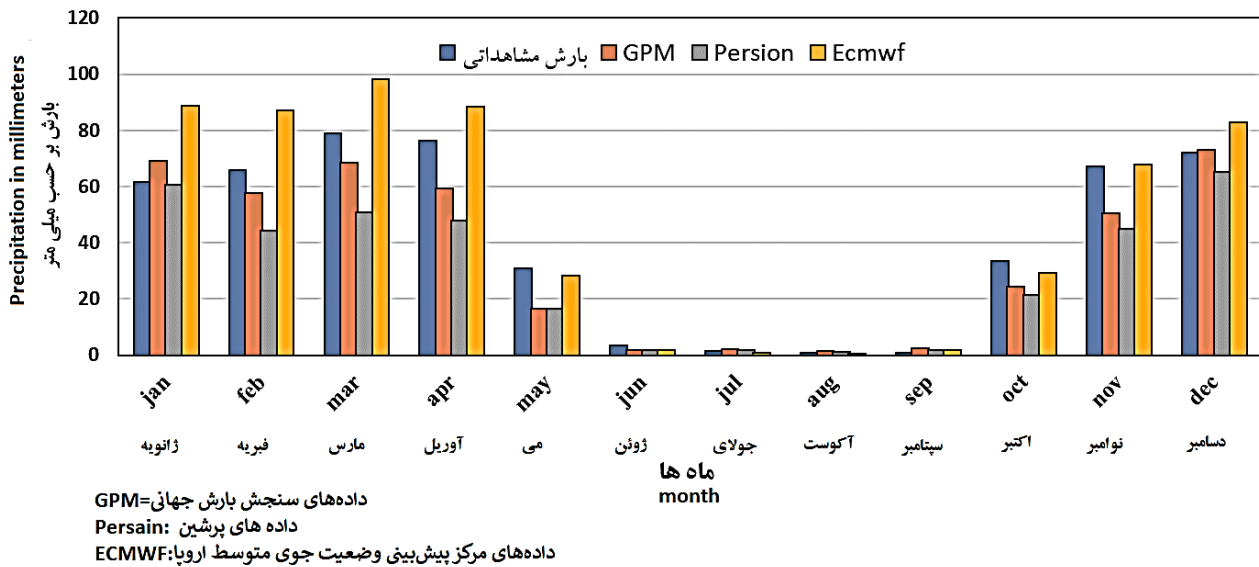


شکل ۳- محاسبه شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ی در مقیاس ماهانه
Figure 3- Calculation of statistical indicators of satellite products on a monthly scale

جدول ۳- مقایسه میانگین شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ی در مقیاس ماهانه

Table 3- Comparison of average statistical indicators of satellite products on a monthly scale

ماهانه Monthly	میانگین مطلق خطا MAD	ریشه میانگین مربع خطا RMSE	ضریب همبستگی r(XY)	ضریب نش- ضریب همبستگی NSE	ضریب تعیین R ²	انحراف خطا MBE	نسبت هشدار اشتباه POD	نسبت هشدار اشتباه FAR	شاخص موفقیت بحرانی CSI
داده‌های سنجش بارش جهانی GPM	10.5	15.08	0.95	0.74	0.91	10-	0.93	0.18	0.88
داده‌های پرشین PERSIAN	14.51	19.35	0.92	0.62	0.86	14.1-	0.78	0.24	0.79
داده‌های مرکز پیش‌بینی وضعیت جوی متوسط اروپا ECMWF	13.12	17.94	0.94	0.52	0.9	13.2	0.88	0.23	0.73



شکل ۴- میانگین بارش ماهانه محصولات ماهواره‌ای و بارش مشاهده‌ای (میلی‌متر)

Figure 4- Average monthly precipitation of satellite products and observed precipitation (mm)

محصولات GPM نسبت به سایر محصولات دارای اعتبار بیشتری هستند (جدول ۴). در مقیاس سالانه مقادیر MBE برای دو مدل GPM و ECMWF مثبت است (به ترتیب ۳۶ و ۵۲) که نشان می‌دهد این دو مدل مقدار بارندگی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند؛ اما مقدار MBE در مدل PERSIAN منفی (۴۱-) است که نشان می‌دهد محصولات این ماهواره مقدار بارندگی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است، (جدول ۴ و شکل ۶). منطقه مورد مطالعه، سرزمینی عمدتاً مرتفع و کوهستانی است که در فصول و ماه‌های مختلف تحت تأثیر سامانه‌های همیدی با منشأ متفاوت (پرفشار سیبری، پرفشار آزور، کم‌فشار سودان، سیکلون‌های مدیترانه) است و با توجه به اینکه هنوز محصولات ماهواره‌ای در مدل‌سازی اثرات پیچیده توپوگرافی بر بارش و سامانه‌های بارشی، مشکل دارند (Sharifi et al., 2019; Barros & Arulraj, 2020)، ممکن است مقادیر بارش برآورد شده و عدم قطعیت محصولات ماهواره‌ای در فصول و ماه‌های سال متفاوت باشد.

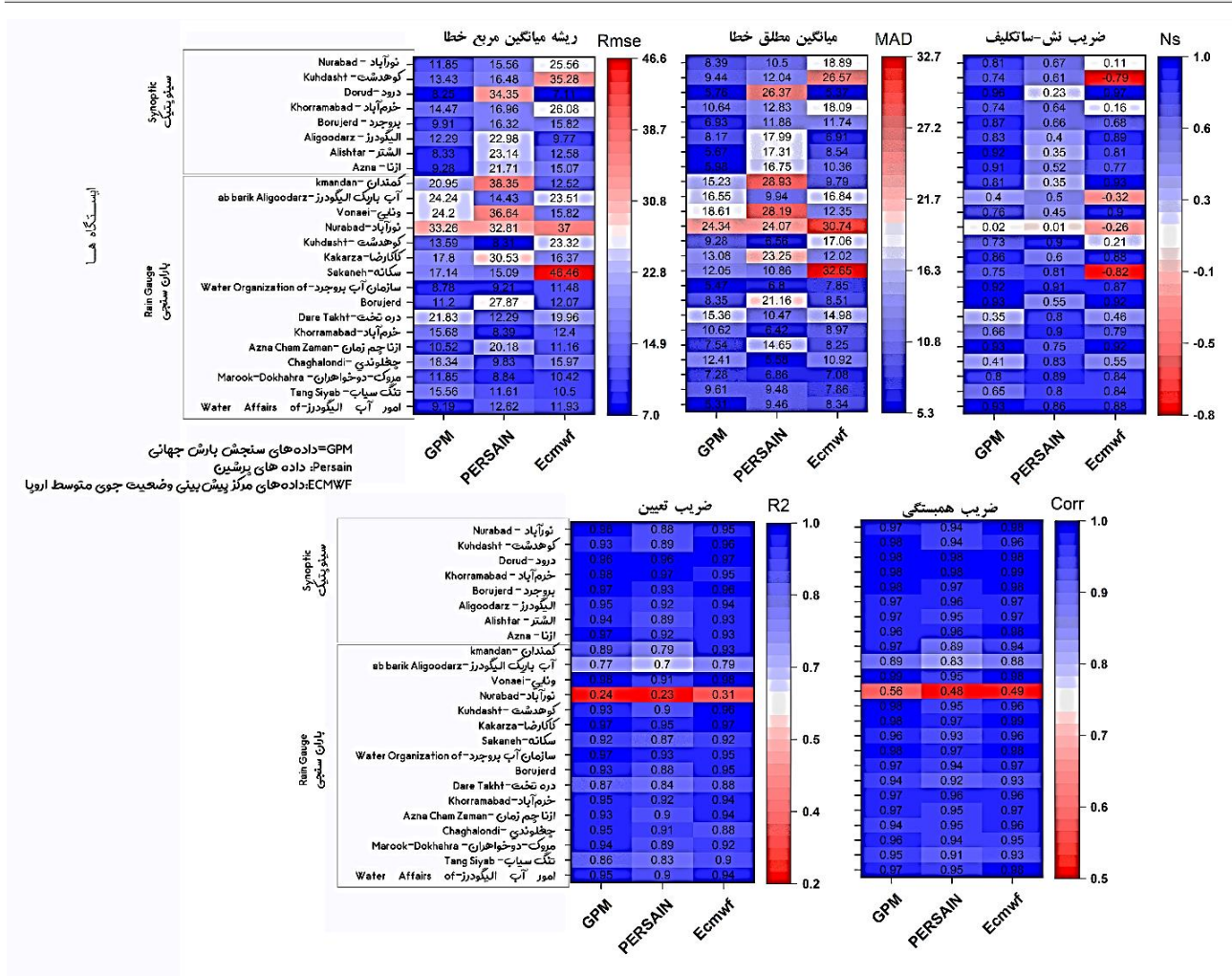
شاخص‌های POD، FAR، CSI در مقیاس سالانه نشان داد که محصولات ماهواره‌ای GPM با (POD=0.82) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ای: ECMWF با (POD=0.74) و PERSIAN با (POD=0.79) بارش را در دقیق‌تر تخمین می‌زند. همچنین آماره FAR نشان داد که محصولات ماهواره‌ای GPM با (FAR=0.22) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ای: ECMWF با (FAR=0.31) و PERSIAN با (FAR=0.26) دارای پیش‌بینی بارندگی‌های غیرواقعی کمتری است (جدول ۴).

شاخص‌های احتمالاتی مورد استفاده (CSI، FAR، POD) در مقیاس ماهانه نشان داد که محصولات ماهواره‌ای GPM با (POD=0.93) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ای: ECMWF با (POD=0.88) و PERSIAN با (POD=0.78) بارش را در دقیق‌تر تخمین می‌زند. همچنین آماره FAR نشان داد که محصولات ماهواره‌ای GPM با (FAR=0.18) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ای: ECMWF با (FAR=0.23) و PERSIAN با (FAR=0.24) دارای پیش‌بینی بارندگی‌های غیرواقعی کمتری است.

ارزیابی بارش سالانه محصولات ماهواره‌ای

بررسی شاخص‌های آماری در مقیاس سالانه نشان داد که در هر سه محصول میزان دقت محصولات مناسب است و محصولات دقت کافی در برآورد برش را نشان می‌دهند. ضریب همبستگی و ضریب نش ساتکلیف (NSE) نیز کفایت محصولات را نشان داد (شکل ۵)؛ اما میزان دقت برآورد سالانه بارش با توجه به شاخص‌های آماری، کمتر از محصولات ماهانه است.

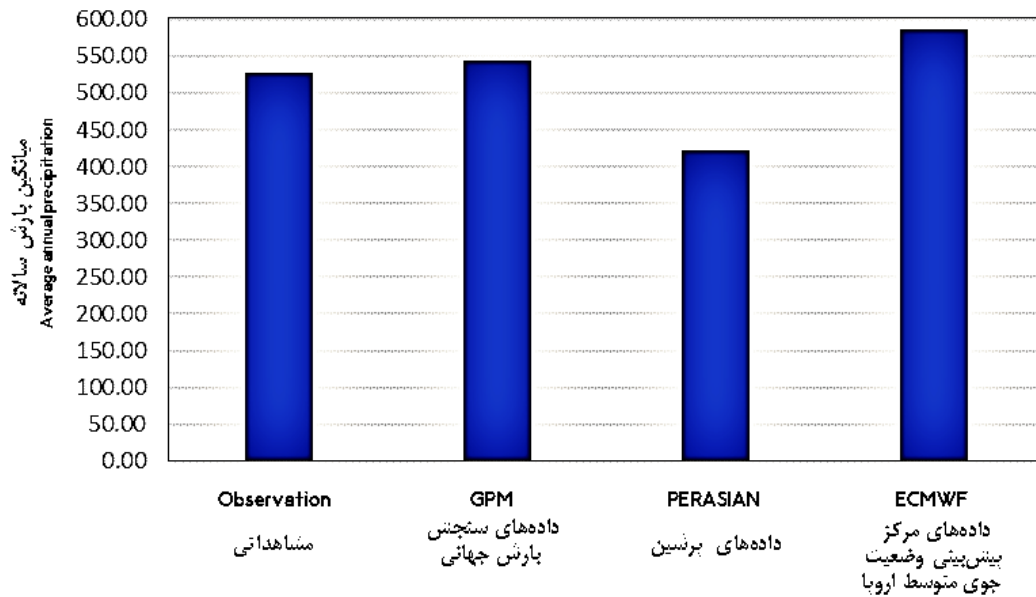
بر اساس میانگین شاخص‌های آماری کمترین مقدار خطای (RMSE, MAD) مربوط به محصولات پایگاه داده‌های GPM و در مرحله بعد مربوط به محصولات ECMWF و PERSIAN است. بیشترین میزان ضریب همبستگی (CORR) به ترتیب با مقدار (۰/۷۵- ۰/۷۳-۰/۷۴) مربوط به محصولات ECMWF, PERSIAN, GPM است. به‌طور کلی این محصولات برای تخمین بارش‌های سالانه، دارای اعتبار کمتری نسبت به بارش ماهانه می‌باشند و به‌صورت کلی



شکل ۵- محاسبه شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ی در مقیاس سالانه
Figure 5- Calculation of statistical indicators of satellite products on an annual scale

جدول ۴- مقایسه میانگین شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ی در مقیاس سالانه
Table 4- Comparison of average statistical indicators of satellite products on an annual scale

سالانه Yearly	میانگین مطلق خطا MAD	ریشه میانگین مربع خطا RMSE	ضریب همبستگی R(XY)	ضریب نش- ساتکلیف NSE	ضریب تعیین R ²	انحراف خطا MBE	نسبت هشدار اشتباه POD	نسبت هشدار اشتباه FAR	شاخص موفقیت بحرانی CSI
داده‌های سنجش بارش جهانی GPM	124.7	149.9	0.75	0.5	0.61	36	0.82	0.22	0.75
داده‌های پرشین PERSIAN	146.6	174.3	0.74	0.61	0.57	41-	0.79	0.26	0.69
داده‌های مرکز پیش‌بینی وضعیت جوی متوسط اروپا ECMWF	147.6	173	0.73	0.76-	0.55	52	0.74	0.31	0.63



شکل ۶- میانگین بارش سالانه محصولات ماهواره‌ی و بارش مشاهده‌ای (میلی‌متر)

Figure 6- Average annual precipitation of satellite products and observed precipitation (mm)

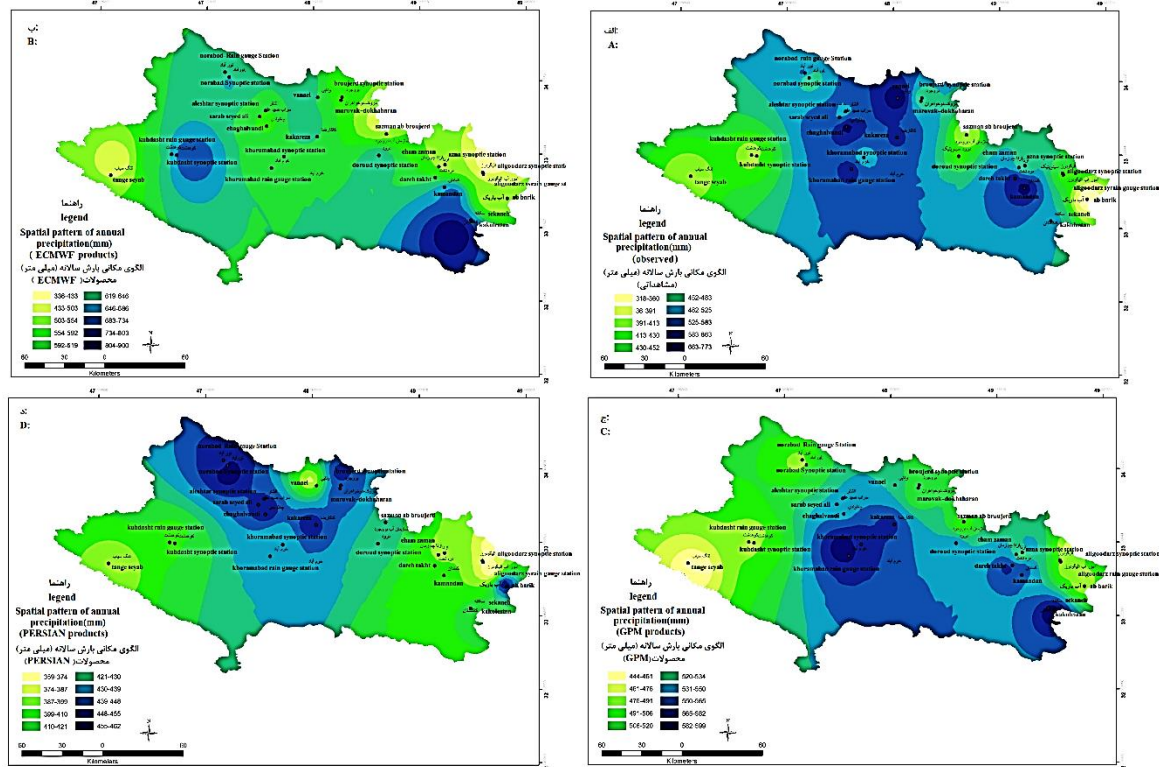
هستند. اگرچه محصولات ماهواره‌ای، میزان بارش را با وضوح مکانی و زمانی بالا و تأخیر کم ارائه می‌دهند اما اختلاف بین محصولات موجود دقت آن‌ها را برای مناطق کوهستانی زیر سؤال می‌برد، بنابراین نیاز به ارزیابی کامل دقت آن‌ها قبل از پیشنهاد برای کاربرد آن‌ها است. در این مطالعه از محصولات ماهواره‌ای (GPM و PERSIAN) و داده‌های بازکاوی (ECMWF) برای برآورد بارش در مناطق کوهستانی فاقد ایستگاه در استان لرستان استفاده شد. نتایج بررسی محصولات ماهواره‌های (GPM, PERSIAN, ECMWF) نشان داد که هر سه محصول در برآورد بارش روزانه دارای دقت کافی نیستند. برآورد بارش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی در مقیاس ماهانه نشان داد این محصولات نتایج مطلوبی برای تخمین بارش ارائه می‌دهند. همچنین در مقیاس سالانه با توجه به مقدار خطاهای آماری، نتایج مناسبی از برآورد بارش به‌دست آمد. این پژوهش در مقیاس روزانه با پژوهش (Miri et al., Dezfooli et al., 2016; Khanmohammadi et al., 2022; Emami et al., 2020; Paolo et al., 2022) و در مقیاس ماهانه و سالانه به بررسی محصولات بارش ماهواره‌ی در مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه پرداختند، مشابه است. از بین سه محصول، ماهواره GPM با توجه به میزان خطاها و همچنین الگوی مکانی بارش تخمین زده‌شده، از دقت بهتری برخوردار است. همچنین با توجه به نتایج شاخص MBE در مقیاس روزانه و ماهانه محصولات ECMWF بیش برآورد و محصولات PERSIAN و GPM کم برآورد در تخمین بارش هستند. در مقیاس سالانه محصولات GPM و ECMWF بیش برآورد و محصولات PERSIAN کم برآورد هستند.

الگوی مکانی بارش سالانه محصولات ماهواره‌ای

بر اساس بارش مشاهده‌ای ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیشترین بارش محدوده در غرب و مرکز منطقه مورد مطالعه رخ می‌دهد و قسمت‌های شرقی منطقه کمترین مقدار بارش را دارند. در محصول ماهواره‌ی ECMWF با جابجایی هسته‌های بارش به سمت غرب و شرق منطقه، الگوی مکانی مقدار بارش تغییر کرده است که متفاوت از واقعیت اقلیمی منطقه است. در محصول ماهواره‌ی PERSIAN هسته‌های بارش با جابجایی به سمت مرکز و شمال، الگوی مکانی به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود ولی همچنان متفاوت از واقعیت اقلیمی منطقه است. در محصول ماهواره‌ی GPM الگوی مکانی مقدار بارش سالانه تقریباً شبیه به الگوی مکانی بارش مشاهده‌ای است و هسته‌های بارش در مرکز و غرب منطقه مشخص شده است؛ بنابراین با توجه به الگوی مکانی بارش سالانه، محصولات ماهواره‌ی GPM دارای دقت بهتری نسبت به سایر محصولات است (شکل ۷).

نتیجه‌گیری

بارش یک متغیر کلیدی اقلیمی است که پیش‌بینی آن در مدل‌های عددی آب‌وهوا بسیار دشوار است. بارش در مناطق کوهستانی به‌شدت در بعد زمانی-مکانی متفاوت است، بنابراین داشتن داده‌های دقیق برای ارزیابی منابع آب در این مناطق بسیار مهم است. با این حال، در بسیاری از مناطق کوهستانی، تعداد کمی از ایستگاه‌های هواشناسی در دسترس هستند. امروزه ماهواره‌ها به‌عنوان جایگزین مناسب و جذابی برای اندازه‌گیری بارش در مناطق فاقد ایستگاه مطرح



شکل ۷- الگوی مکانی بارش سالانه مشاهداتی و محصولات ماهواره‌ی الف: بارش مشاهداتی، ب: محصولات ECMWF، ج: محصولات GPM، د:

محصولات PERSIAN

Figure 7- Spatial pattern of annual observed precipitation and satellite products A: observed precipitation, B: ECMWF products, C: GPM products, D: PERSIAN products

References

1. Abdulhaipour, A., Ahmadi, H., Aminnejad, B. (2022). Exponential microscale of satellite precipitation considering heterogeneous spatial relationship between precipitation and environmental variables. *Natural Geography*, 14(54), 109-126. (In Persian)
2. Adane, G.B., Hirpa, B.A., Gebru, B.M., Song, C., & Lee, W.K. (2021). Integrating satellite rainfall estimates with hydrological water balance model: rainfall-runoff modeling in awash river basin, Ethiopia. *Water*, 13(6), 800. <https://doi.org/10.3390/w13060800>
3. Azizi, J., Rasolzadeh, A., Rahmati, A., Shayghi, A., & Bakhter, A. (2019). Evaluation of the performance of Era-5 reanalyzed data in estimating daily and monthly rainfall in Ardabil province. *Iran Water and Soil Research (Agricultural Sciences of Iran)*, 51(11), 2937-2951. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.302176.668600>
4. Barros, A.P., & Arulraj, M. (2020). Remote sensing of orographic precipitation. *Satellite Precipitation Measurement*, 2, 559-582. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35798-6_6
5. Berthomier, L., Perier, L., & Espresso. (2023) A Global deep learning model to estimate precipitation from satellite observations. *Meteorology*, 2, 421-444. <https://doi.org/10.3390/meteorology2040025>
6. Chen, S., Zhang, L., & Dunxian, C. (2019). Spatial downscaling of tropical rainfall measuring Mission (TRMM) annual and monthly precipitation data over the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, China. *Water*, 11(3), P.568. 12. <https://doi.org/10.3390/w11030568>
7. Chen, X., & Huang, G. (2020). Applicability and hydrologic substitutability of TMPA satellite precipitation product in the Feilaixia Catchment, China. *Water*, 12(6), 1803. <https://doi.org/10.3390/w12061803>
8. Dejene, I.N., Wedajo, G.K., & Bayissa, Y.A. (2023). Satellite rainfall performance evaluation and application to monitor meteorological drought: a case of Omo-Gibe basin, Ethiopia. *Nat Hazards* 119, 167–201. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06127-2>

9. Dezfooli, D., Hosseini-Moghari, S.M., & Ebrahimi, K. (2016). Comparison of TRMM-3B42 V7 and PERSIANN satellites precipitation data with ground-based data (Case study: Gorganrood Basin, Iran). *JWSS*, 20(76), 85-98. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.76.85>
10. Dinku, T., Ceccato, P., & Connor, S.J. (2011). Challenges of satellite rainfall estimation over mountainous and arid parts of east Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 5965–5979. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.499381>
11. Emami, H., Salajegheh, A., Moghaddamnia, A., & Khalighi Sigaroudi, S. (2020). Evaluation of TRMM satellite accuracy and efficiency in estimating monthly rainfall in Gorganroud watershed. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 7(3), 719-729. <https://doi.org/10.22059/ije.2020.261641.917>
12. Fatemi, Q.S., Yazdan Panah, H. (2013). evaluation of different interpolation methods in order to estimate the precipitation data of Isfahan province. *Geographical Space*, 12(40). (In Persian)
13. Gao, Y., Guan, J., Zhang, F., Wang, X., & Long, Z. (2022). Attention-unet-based near-real-time precipitation estimation from fengyun-4A satellite imageries. *Remote Sensing*, 14, 2925. <https://doi.org/10.3390/rs14122925>
14. Ghairi Sara, F., & Yazdan Panah, H. (2013). Evaluation of different interpolation methods in order to estimate the precipitation data of Isfahan province. *Geographical Space*, 12(40).
15. Han, P.D., Long, Z., Han, M., Du, L., Dai & Hao, X. (2019). Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling. *Remote Sensing of Environment*, 224, 44-59. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.041>
16. Hosseini, M., Seyed Mohammad, I., & Shahab, E. (2017). Introduction of global networked precipitation databases. *Water and Sustainable Development*, 5(2), 153-162. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i2.70826>
17. Hsu, K.L., Gao, X., Sorooshian, S., & Gupta, H.V. (1997). Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology*, 36, 1176-1190. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036%3C1176:PEFRS1%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036%3C1176:PEFRS1%3E2.0.CO;2)
18. <https://chrsdata.eng.uci.edu>
19. <https://gpm.nasa.gov/data>
20. <https://www.ecmwf.int>
21. Huffman, G., Stocker, E., Bolvin, D., Nelkin, E., & Tan, J.(2019). GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree × 0.1 degree V06. Available online: <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06>
22. Jiang, S.L., Ren, B., Yong, Y., Hong, X., Yang & Yuan, F. (2016). Evaluation of latest TMPA and CMORPH precipitation products with independent rain gauge observation networks over high-latitude and low-latitude basins in China. *Chinese Geographical Science*, 26(4), 439-455. <https://doi.org/10.1007/s11769-016-0818-x>
23. Khanmohammadi, Z., Mahjoobi, E., Gharachelou, S., & Banikhedmat, A. (2022). Statistical assessment of satellite rainfall products in daily and monthly gauge spatial scales. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 14(4), 512-527. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.355269.1908>
24. Kubota, T., Aonashi, K., Ushio, T., Shige, S., Takayabu, Y.N., Kachi, M., Arai, Y., Tashima, T., Masaki, T., & Kawamoto, N. (2020). Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era. In *Satellite Precipitation Measurement*; Springer: Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_20
25. Lu, X., Li, J., Liu, Y., Li, Y., & Huo, H.(2023). Quantitative precipitation estimation in the Tianshan mountains based on machine learning. *Remote Sensing*, 15, 3962. <https://doi.org/10.3390/rs15163962>
26. Ma, Z., He, K., Tan, X., Xu, J., Miri, M., Rahimi, M., & Noroozi, A. (2019). Evaluation and comparison of GPM and TRMM daily precipitation with observed precipitation across Iran. *Watershed Engineering and Management*, 11(4), 972-983. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.121397.1469>
27. Ma, Z., Xu, J., He, K., Han, X., Ji, Q., Wang, T., Xiong, W., & Hong, Y. (2020). An updated moving window algorithm for hourly-scale satellite precipitation downscaling: A case study in the southeast coast of China. *Journal Of Hydrology*, 581, P.124378. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124378>
28. NASA Global Precipitation Measurement (GPM).(2020). Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 06.
29. Ordoni, M., Memarian, H., Akbari, M., & Pourreza, M. (2019). Validation of GPM-IMERG satellite rainfall data in half-hourly and daily time scales (case study: Gorganrood watershed). *Journal of Water and Soil Protection Research*, 27(4), 149-166. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17531.3301>
30. Panthi, J.P., Dahal, M.L., Shrestha, S., Aryal, N.Y., Krakauer, S.M., Pradhanang & Karki, R. (2015). Spatial and temporal variability of rainfall in the Gandaki River Basin of Nepal Himalaya. *Climate*, 3(1), 210-226. <https://doi.org/10.3390/cli3010210>
31. Paolo, F., Luca, B., Raphael, Q., Luca, C., Carla, S., Wolfgang, W., & Angelica, T. (2022). High resolution (1 km) satellite rainfall estimation from SM2RAIN applied to Sentinel-1: Po River Basin as case study. *Hydrology Earth System Science*, 26, 2481–2497. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2481-2022>

32. Ruan, H., Zou, S., Yang, D., Wang, Y., Yin, Z., Lu, Z., & Xu, B. (2017). Runoff simulation by SWAT model using high-resolution gridded precipitation in the upper Heihe River Basin, northeastern Tibetan Plateau. *Water*, 9(11), 866. <https://doi.org/10.3390/w9110866>
33. Sharifi, E., Eitzinger, J., Dorigo, W. (2019). Performance of the state-of-the-art gridded precipitation products over mountainous Terrain: A regional study over Austria. *Remote Sens.*, 11, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs11172018>
34. Shokri, K., Akhund Ali, S., & Sharifi, M. (2019). Evaluating the performance of PERSIANN and PERSIANN-CDR satellite precipitation algorithms and investigating the impact of roughness on it (case study: Helleh watershed). *Eco-Hydrology*, 7(2), 511-530. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jdmal.2020.38472>
35. Tafta, A., Mallah, S., & Ebrahimi, N. (2019). Examining the results of daily, ten-day and monthly data of satellite images in estimating the amount of precipitation using the Google Earth Engine system in Khuzestan province. *Protection of water and soil resources (scientific-research)*, 9(3), 93-104. (In Persian)
36. Talchabhadel, R., Aryal, A., Kawaike, K., Yamanoi, K., Nakagawa, H., Bhatta, B., Karki, S., & Thapa, B.R. (2021). Evaluation of precipitation elasticity using precipitation data from ground and satellite-based estimates and watershed modeling in Western Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 33, 100768. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100768>
37. Tan, X., Yong, B., & Ren, L. (2018). Error features of the hourly GSMaP multi-satellite precipitation estimates over nine major basins of China. *Hydrology Research*, 49(3), 761-779. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.263>
38. Taye, M., Sahlou, D., Zaitchik, B.F., & Neka, M. (2020). Evaluation of satellite rainfall estimates for meteorological drought analysis over the Upper Blue Nile Basin. *Ethiopia Geosci* 10(9), 352. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090352>
39. Vasavi, P., Krishna, V.S., Sri P.D., Navena, M., & HariKiran, C. (2022). Rainfall estimation from satellite images using cloud classifications, 2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon), Vijaypur, India, , pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/NKCon56289.2022.10126540>
40. Wang, C., Xu, J., Tang, G., Yang, Y., & Hong, Y.(2020). Infrared precipitation estimation using convolutional neural network. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 8, 8612–8625. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2989183>
41. Wei, L., Jiang S., Ren, L., Zhang, L., Wang, M., & Duan, Z. (2020). Preliminary utility of the retrospective IMERG precipitation product for large-scale drought monitoring over Mainland China. *Remote Sens*, 12, 2993. <https://doi.org/10.3390/rs12182993>
42. Wilks, D.S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic press.
43. Yousefi, K., Alireza, N., & Jamei, M. (2021). Combination of interpolation methods and TRMM satellite precipitation products in order to increase the accuracy of rainfall maps in Mazandaran province. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 28(3), 49-70. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2022.19286.3477>
44. Zeng, Q.H., Chen., C.Y., Xu. M.X., Jie, J., Chen, S.L., & Liu, J. (2018). The effect of rain gauge density and distribution on runoff simulation using a lumped hydrological modelling approach. *Journal of Hydrology*, 563, 106-122. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.058>