

Evaluation of satellite precipitation products for estimating heavy precipitation on the Caspian coast

Sajad Mahmoudi Babolan¹, Saeed Nastarani Amoghin^{2*}, Ali Rasoulzadeh³

¹ Graduated M.Sc. Student, Department of Water Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran

² Graduated M.Sc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabil, Ardabil, Iran

Abstract

Introduction

Climate changes and global warming have caused changes in weather patterns and the occurrence of serious events in different regions of the earth. Therefore, it is necessary to predict destructive floods, especially in coastal areas, to announce flood warnings and control them. Satellite precipitation estimation systems often generate data with global coverage that can provide information in areas where data from other sources are not available. Satellite retrieval and estimation systems, rain gauges, and radar networks complement each other regarding coverage and rainfall monitoring capabilities. Satellite precipitation estimation systems often produce data with global coverage. One of the main advantages of satellite-based precipitation products is the ease of real-time data availability and high spatial-temporal resolution. Currently, various satellite precipitation products such as GPM, TRMM, GSMAP, CMORPH, CHIRPS, etc. are available to the public.

Materials and Methods

In this study, the southwest coastline of Caspian Sea, Gilan province is considered as the study area and the accuracy of four satellite-based products namely CHIRPS, GPIM-IMERG, PERSIANN CDR, TRMM-3B42V7 is compared in order to estimate the heavy precipitation from 2017 to 2021. Estimates are performed using categorical indices including PC, CSI, BIAS, and HSS and statistical criteria of correlation coefficient (Corr) and normalized root mean square error (nRMSE).

Results and Discussion

Evaluations and statistical criteria are conducted by comparing estimated satellite precipitation with ground stations through definitive indicators as well as the height of each station and the average of all stations respectively. The results show that in the PC index in eight stations, all of which are located at an altitude of fewer than 40 m above sea level and on the Caspian coast, the product IMERG scores higher than other products. The weakest performance in the PC index at the threshold of more than 5 mm belongs to TRMM and PERSIANN-CDR, which have the lowest scores jointly in eight stations. According to the results obtained from CSI, IMERG product had better performance in all stations except the Manjil station. Additionally, evaluation of the height of stations and the results obtained from this index demonstrate the fact no relationship was found between station height and product performance. In the Bias quality index, in IMERG and CHIRPS products, the bias of each station is directly related to its height, so that in higher stations, rainfall is overestimated, and vice versa in lower altitudes, the precipitations have been underestimated less than the amount of observation.

Conclusion

The IMERG product has performed better than the other three products in all categorical indices and correlation criteria. Finally, to evaluate and analyze heavy precipitation in the coastal strip of Gilan province and studies related to precipitation estimation, it is suggested that the IMERG product be used as a priority. The analysis carried out in this study, from the collection of satellite precipitation bases in estimating heavy precipitation in coastal areas, reveals the need to study and investigate this issue as much as possible in future research.

Keywords: CHIRPS, GPM-IMERG, Heavy precipitation events, PERSIANN-CDR, Remote Sensing, TRMM

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: mahmoudi.sa@ut.ac.ir

Citation: Mahmoudi Babolan, S., Nastarani Amoghin, S., & Rasoulzadeh, A. (2022). Evaluation of satellite precipitation products for estimating heavy precipitation in the Caspian coast. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(4), 107-122.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.11147.1102

DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.8.9

Received: 12 July 2022, Received in revised form: 04 August 2022, Accepted: 04 August 2022, Published online: 04 August 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2022, Vol. 2, No. 4, pp. 107-122

Publisher: University of Mohaghegh Ardabil

© Author(s)





ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای جهت برآورد رخدادهای بارشی سنگین در نوار ساحلی دریای خزر

سجاد محمودی بابلان^{۱*}، سعید نسترنی عموقین^۲، علی رسول‌زاده^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده‌گان ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۳ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

بارش یکی از متغیرهای مهم برای بسیاری از کاربردها و رشته‌های مرتبط با منابع آب و سامانه ژئوفیزیک زمین بوده که عنصر اصلی در وقوع رخدادهای شدید و سیل‌آساست. سامانه‌های تخمین بارش ماهواره‌ای داده‌هایی اغلب با پوشش جهانی تولید می‌کنند که می‌توانند اطلاعاتی را ارائه دهند که داده‌های منابع دیگر ثبت بارش در دسترس نیستند. در این مطالعه، محدوده نوار ساحلی جنوب غرب دریای خزر، استان گیلان، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده و دقت چهار محصول ماهواره‌ای GPM-IMERG، CHIRPS، PERSIANN-CDR و TRMM-3B42V7، برای برآورد بارش‌های سنگین از سال ۱۳۹۶ تا سال ۱۴۰۰ مقایسه شد. ارزیابی‌ها به‌صورت مقایسه بارش‌های برآورد شده ماهواره‌ای با ایستگاه‌های زمینی با در نظر گرفتن ارتفاع هر ایستگاه و میانگین کل ایستگاه‌ها، با استفاده از شاخص‌های قطعی شامل PC، CSI، BIAS و HSS و معیارهای آماری همبستگی (Corr) و نرمال شده مجذور میانگین مربعات خطا (nRMSE)، انجام شد. نتایج نشان داد با توجه به شاخص PC در هشت ایستگاه، بندر انزلی، رشت، رودسر، تالش، آستارا، رشت (کشاورزی)، کياشهر و لاهیجان که همگی در ارتفاعی کم‌تر از ۴۰ متر از سطح آب‌های آزاد و در نوار ساحل دریای خزر پراکنده‌اند، محصول بارش ماهواره‌ای IMERG امتیاز بیش‌تری نسبت به مابقی محصولات کسب کرد. ضعیف‌ترین عملکرد در شاخص PC در آستانه بیش‌تر از پنج میلی‌متر، مربوط به ماهواره‌های TRMM و PERSIANN-CDR بود که کم‌ترین امتیازات را در همه ایستگاه‌ها کسب کردند. نتایج شاخص CSI نشان داد که در همه ایستگاه‌ها، به‌جز ایستگاه منجیل، محصول بارش ماهواره‌ای IMERG عملکرد بهتری دارد. هم‌چنین در بررسی تأثیر ارتفاع ایستگاه‌ها و برآورد ماهواره‌ای بارش در شاخص CSI، ارتباطی بین ارتفاع ایستگاه‌ها با عملکرد محصولات یافت نشد. در شاخص کیفی Bias، در محصولات IMERG و CHIRPS، سوگیری هر ایستگاه ارتباط مستقیمی با ارتفاع آن دارد به‌طوری‌که در ایستگاه‌های مرتفع بارش بیش برآورد شده و بر عکس در ایستگاه‌های کم ارتفاع‌تر بارش‌ها کم‌تر از میزان مشاهداتی برآورد شده‌اند، ولی در محصولات PERSIANN-CDR و TRMM در همه ایستگاه‌ها بارش‌های تخمینی کم برآورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده محصول IMERG نسبت به سه محصول CHIRPS، PERSIANN-CDR و TRMM بهتر عمل کرده است.

واژه‌های کلیدی: رخدادهای بارش سنگین، سنجش از دور، IMERG، PERSIANN-CDR، CHIRPS، TRMM

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mahmoudi.sa@ut.ac.ir

استناد: محمودی بابلان، س، نسترنی عموقین، س، و رسول‌زاده، ع. (۱۴۰۱). ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای جهت برآورد رخدادهای بارشی سنگین در نوار ساحلی دریای خزر. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۴)، ۱۰۷-۱۲۲.

DOI: 10.22098/MMWS.2022.11147.1102
DOR: 20.1001.1.27832546.1401.2.4.8.9



تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۱، دوره ۲، شماره ۴، صفحه ۱۰۷ تا ۱۲۲
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی در مناطق مختلف کره زمین باعث تغییر در الگوهای آب‌وهوایی و وقوع رخدادهای جدی شده است (IPCC, 2021)، به طوری که در دهه گذشته، سیل‌های ناشی از این رخدادهای زندگی بیش از ۵۸ میلیون نفر را در جهان تحت تأثیر قرار داده و تقریباً ۲۰۰۰۰ نفر را به کام مرگ کشانده است (Samer et al., 2018). از این رو، پیش‌بینی سیل‌های مخرب به خصوص در مناطق ساحلی، برای اعلام هشدار و مهار سیلاب ضروری بوده و توجه پژوهش‌گران مختلف را در سراسر جهان به خود جلب کرده است. تا به امروز چندین رویکرد برای پیش‌بینی سیل توسعه داده شده که می‌توان به مدل‌های مبتنی بر فیزیک جو، مدل‌های مفهومی و مدل‌های مبتنی بر داده اشاره کرد. در این میان، رویکرد مبتنی بر داده به دلیل سادگی و دقت، توجه بیشتری را در پرداختن به این رویدادهای پیچیده به خود جلب کرده است (Yeditha et al., 2020).

بارش یکی از متغیرهای مهم برای بسیاری از کاربردها و رشته‌های مرتبط با منابع آب و سامانه ژئوفیزیک زمین بوده که عنصر اصلی در وقوع رخدادهای شدید و سیل‌آساست. سامانه‌های بازبایی و تخمین ماهواره‌ای، شبکه‌های باران‌سنجی و راداری از نظر پوشش و قابلیت نظارت بر بارش، مکمل یکدیگر هستند (Conti et al., 2014). برای چندین دهه، مجموعه داده‌های زمینی و شبکه‌های باران‌سنجی، منابع اولیه برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی سیل بوده‌اند. اما به دلیل معایبی مانند: محدود بودن به مکان و توزیع فضایی نامناسب و همچنین هزینه‌های مربوط به نگهداری و تهیه ابزارهای لازم برای نصب در ایستگاه‌ها، استفاده از آن‌ها به صورت شبکه‌ای متراکم به خصوص در مناطق صعب‌العبور به صرفه نیست (Agarwal et al., 2020).

سامانه‌های تخمین بارش ماهواره‌ای، اغلب داده‌هایی با پوشش جهانی تولید می‌کنند. از مزایای اصلی محصولات بارشی مبتنی بر ماهواره می‌توان به سهولت در دسترس بودن داده‌ها در زمان واقعی و قدرت تفکیک زمانی-مکانی بالا اشاره کرد (Yeditha et al., 2020). در حال حاضر محصولات مختلف بارش ماهواره‌ای مانند GPM¹، TRMM²، PERSIANN³، GSMaP⁴، CMORPH⁵ و CHIRPS⁶ غیره در دسترس عموم قرار دارد. ارزیابی این محصولات بهتر است با توجه به یک منطقه جغرافیایی خاص مورد

توجه قرار گیرد؛ زیرا عملکرد هر محصول می‌تواند با ویژگی‌های مکانی منطقه مرتبط باشد (Conti et al., 2014). به این منظور مطالعاتی در ارتباط با برآورد بارش ماهواره‌ای انجام گرفته است. برای نمونه، Sohn et al. (2010) پژوهشی را بر عرض‌های جغرافیایی میانی انجام دادند. نتایج نشان داد برخی از محصولات بارش ماهواره‌ای (TRMM-TMPA⁷، CMORPH، PERSIANN و NRL-blended⁸) در شبه‌جزیره کره، بارش را کم‌تر برآورد می‌کنند. Kidd et al. (2012) نیز کم برآوردی کلی توسط محصولات ماهواره‌ای (CMORPH، TMPA، NRL و PERSIANN) در اروپا را گزارش کرده و به برخی از مشکلات ناشی از مناطقی در عرض جغرافیایی بالا و میانی، مانند کم‌برآوردی شدت بارش، وقوع بارش‌های یخ‌زده و مسائل مربوط به عوارض زمینی اشاره کردند. مطالعات مختلفی برای برآورد بارش و ارزیابی محصولات مختلف بارش ماهواره‌ای در ایران انجام شده است (Mohammadrezaei et al., 2022; Rahimiani Iranshahi et al., 2022; Hejazizadeh et al., 2022; Ghoreishi Gharetikan et al., 2021; Kiany et al., 2020; Mahbod et al., 2019; Ghajarnia et al., 2018; Darand et al., 2017).

در پژوهشی Qureshi et al. (2021)، مطالعه‌ای را در سه منطقه مرطوب با بارندگی زیاد، نیمه‌خشک و خشک ایران با هدف بررسی عوامل مهم در مدیریت منابع آب مثل خشک‌سالی و سیل با استفاده از محصولات بارش ماهواره‌ای انجام دادند. با توجه به نتایج که محصولات TRMM و GPM به صورت ماهانه و فصلی در دوره مطالعاتی از سال ۲۰۱۷-۲۰۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفته، هر دو محصول میزان بارندگی را بیش برآورد می‌کنند. نتایج نشان داد که متوسط میزان بارش ۱۱ درصد در شرایط مرطوب، ۵۰ درصد در شرایط نیمه‌خشک و ۴۳ درصد در شرایط آب و هوایی خشک، در مقایسه با داده‌های زمینی بیش برآورد شده‌اند. در نهایت بیش‌ترین دقت در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه و کم‌ترین در مقیاس زمانی سه ماهه به دست آمد. همچنین، Sharifi et al. (2016) به بررسی توانایی تخمین دو محصول بارش ماهواره‌ای IMERG و TRMM و همچنین مدل جهانی میان‌مقیاس ERA-Interim با بارش روزانه ایستگاهی در دوره‌ای یک‌ساله (۲۰۱۴-۲۰۱۵) پرداخته شد. با توجه به نتایج، به‌طور کلی در مقیاس روزانه هر سه ماهواره بارش را کم‌تر از مقادیر ایستگاهی برآورد کردند. مقایسه نتایج حاصل از سه ماهواره نشان داد که ماهواره IMERG بهتر از سایر ماهواره‌ها عمل کرده و بارش را با اختلاف کمی تخمین می‌زند. بر اساس مقیاس ماهانه و فصلی در گیلان تمامی محصولات، در بوشهر و کرمانشاه، ERA-Interim

¹ Global Precipitation Measurement

² The Tropical Rainfall Measuring Mission

³ The Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks

⁴ Global Satellite Mapping of Precipitation

⁵ NOAA CPC Morphing Technique

⁶ Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

⁷ TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis

⁸ Naval Research Laboratory

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، استان گیلان به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد که در نوار ساحلی دریای خزر قرار دارد. میانگین بارندگی سالانه در امتداد خط ساحلی دریای خزر بین ۱۲۰۰ میلی‌متر تا ۱۸۰۰ میلی‌متر متغیر است (Sharifi et al., 2016). این منطقه که از پر بارش‌ترین مناطق کشور محسوب می‌شود، در غرب استان مازندران، شرق استان اردبیل و شمال استان‌های زنجان و قزوین قرار دارد (شکل ۱). مساحت کل استان ۱۳۷۹۰/۵ مترمربع بوده که ۲۹ درصد از آن اراضی کشاورزی، ۴۱ درصد جنگلی و ۱۶ درصد را دشت تشکیل می‌دهد (Behzadi, 2017). از عوامل اصلی بارش‌های سنگین در این منطقه، مجاورت با نوار ساحلی دریای خزر و دامنه‌های غربی رشته‌کوه البرز است.

۲-۲- داده‌های مشاهداتی

در مطالعه حاضر از ۱۳ ایستگاه همدیدی موجود در منطقه استفاده شد که از سواحل دریای خزر با کم‌ترین ارتفاع (۲۳/۶- متر) تا ارتفاعات غربی رشته‌کوه البرز با بیش‌ترین ارتفاع (۱۵۸۱/۴ متر) را شامل می‌شود. رخدادهای سنگین بارشی از سال ۲۰۱۷-۲۰۲۱ (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰) برای ارزیابی با برآوردهای ماهواره‌ای انتخاب شدند. در هر سال شدیدترین و حجیم‌ترین رخدادهای به وقوع پیوسته انتخاب شد که جزئیات هر رخداد در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین موقعیت منطقه مورد مطالعه و مشخصات ایستگاه‌ها به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۳- پایگاه‌های بارش ماهواره‌ای

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای تخمین بارش با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای توسعه یافته است. برآورد بارش به‌صورت ماهواره‌ای با ترکیب داده‌های به‌دست‌آمده از حس‌گرهای حساس به طیف‌های مادون‌قرمز، ماکروویو و غیره انجام می‌گیرد. در مطالعه حاضر از چهار محصول پرکاربرد در این حوزه شامل، بازبایی‌های یکپارچه چند ماهواره‌ای (GPM-IMERG) (GPM)، بارش فروسرخ گروه مخاطرات اقلیمی با داده ایستگاهی (CHIRPS)، تخمین بارش با اطلاعات سنجش از راه دور با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، داده ثبت‌شده اقلیمی (PERSIANN-CDR) و مأموریت اندازه‌گیری بارندگی حراره‌ای (TRMM)، استفاده شد. در جدول ۳ اطلاعات کلی در مورد محصولات ارائه شده و در ادامه به بررسی هر یک از آن‌ها پرداخته شده است.

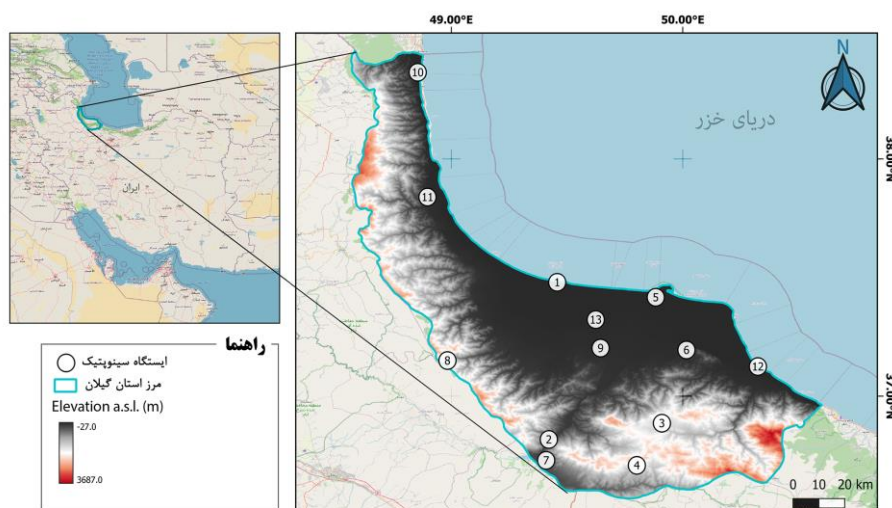
و در تهران، IMERG و ERA-Interim تمایل به کم‌برآوردی بارش دارند، اما در شرایط خشک و نیمه‌خشک، IMERG و TRMM داده‌های بارندگی را بیش برآورد کردند. این پژوهش‌گران در بررسی بارش‌های سنگین دریافتند که ماهواره IMERG نسبت به سایر محصولات در تمام مناطق مورد مطالعه برتری دارد.

Alijanian et al. (2017)، پنج محصول بارش ماهواره‌ای را بر اساس داده‌های زمینی و رژیم‌های مختلف بارندگی در ایران مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش، محصولات PERSIANN، TRMM، PERSIANN-CDR و MSWEP برای یک دوره ۱۰ ساله (۲۰۰۳-۲۰۱۲) ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که ماهواره‌های MSWEP، PERSIANN-CDR و PERSIANN برای تشخیص وقوع بارندگی از شرایط بدون وقوع بارندگی عملکرد خوبی داشتند، درحالی‌که در بارندگی با شدت بالاتر، PERSIANN-CDR از سایر ماهواره‌ها عملکرد بهتری داشت. در مطالعه‌ای دیگر ارزیابی محصول بارش ماهواره‌ای CHIRPS در یک دوره ۱۰ ساله (۲۰۰۵-۲۰۱۴) در ایران انجام شد. نتایج نشان داد که عملکرد CHIRPS در طول ماه‌های بارشی، بالاترین همبستگی را در سواحل جنوبی ایران، که در آن‌جا بارندگی‌های شدید با منشأ همرفتی رخ می‌دهد، دارد. همبستگی با متغیر ارتفاع، در مناطق ساحلی شمال و جنوب کشور (که در آن آب‌های ساحلی باعث افزایش رطوبت در جو بوده) قوی‌تر است. نتایج مقایسه با معیارهای آماری و شاخص‌های قطعی یا طبقه‌بندی‌شده، تأثیر ارتفاع و میزان تخمین بارش بر یکدیگر را نشان می‌دهد (Saeidizand et al., 2018).

رواناب ناشی از بارش‌های سنگین باعث افزایش خطر وقوع سیل می‌شود که غالباً در مناطق شمالی و شمال غربی ایران رخ می‌دهد. در نتیجه، بررسی عملکرد و تخمین بارش با استفاده از محصولات بارش ماهواره‌ای، برای ارزیابی و پایش رویدادهای حدی و سنگین در ایران که گاهی در مناطقی با فقدان یا تراکم کم باران‌سنج‌ها مواجه بوده، بسیار مهم است (Moazami et al., 2016). با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده و به دلیل کمبود مطالعات با مجموعه‌ای از محصولات بارش ماهواره‌ای، در پژوهش حاضر عملکرد و برآورد بارش‌های سنگین و سیل‌آسا در محدوده نوار ساحلی جنوب غرب دریای خزر (استان گیلان)، که از پر بارش‌ترین مناطق کشور با توپوگرافی پیچیده بوده، با استفاده از چهار محصول مبتنی بر ماهواره؛ یعنی GPM-IMERG، CHIRPS، PERSIANN-CDR^۲ و TRMM-3B42V7^۱ بررسی شده است.

¹ Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM

² PERSIANN- Climate Data Record



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعاتی
Figure 1- Location of the study area

جدول ۱- رخدادهای انتخاب شده برای مقایسه با برآوردهای ماهواره‌ای
Table 1- Selected events for comparing with satellite estimates

شماره رخداد	تاریخ شروع رخداد	تاریخ اتمام رخداد	حداکثر بارش ۲۴ ساعته ثبت شده در یک ایستگاه (میلی‌متر)	میانگین کل بارش تجمعی هر رخداد (میلی‌متر)
1	1396/06/17	1396/06/18	264	57
2	1396/07/03	1396/07/14	148.4	232
3	1397/05/19	1397/05/25	132	41
4	1397/07/07	1397/07/10	96.5	60
5	1397/07/14	1397/07/16	156	72
6	1398/01/31	1398/02/04	78.8	81
7	1398/04/09	1398/04/11	85.9	52
8	1398/08/24	1398/09/04	181	153
9	1398/11/20	1398/11/23	113	78
10	1399/05/13	1399/05/17	135.2	54
11	1399/06/01	1399/06/04	113.2	63
12	1399/07/12	1399/07/18	187.5	66
13	1399/09/06	1399/09/10	88	75
14	1400/07/28	1400/07/30	140	65
15	1400/08/20	1400/08/22	134.4	64

ماهواره‌های GPM ترکیب می‌کند (Huffman et al., 2015). همچنین مشاهدات ایستگاه‌های زمینی به صورت ماهانه از طریق الگوریتم اقلیم‌شناسی بارش جهانی (GPCC) برای تخمین‌های ماهواره‌ای ترکیب می‌شود. محصول نهایی IMERG بعد از جمع‌آوری اطلاعات و پردازش آن‌ها تا چهار ماه بعد در دسترس قرار می‌گیرد که در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی و وضع هوا کاربرد دارد. مجموعه داده IMERG-Final، اطلاعات بارندگی و برف را با وضوح 0.1×0.1 درجه (وضوح مکانی) و گام زمانی نیم‌ساعته (وضوح زمانی) ارائه می‌دهد.

۲-۳-۱- ارزیابی‌های یکپارچه چند ماهواره‌ای (GPM-IMERG)

پس از پایان مأموریت TRMM در سال ۲۰۱۵، GPM با مشارکت مجموعه‌ای از ماهواره‌ها، نقش اصلی ارائه داده برای محصولات بارشی را بر عهده گرفت. GPM علاوه بر اندازه‌گیری میزان بارندگی، می‌تواند بارش برف کم‌تر از 0.5 میلی‌متر در ساعت را نیز ثبت کند. همچنین می‌تواند عرض‌های جغرافیایی بین 65 درجه در نیمکره شمالی و جنوبی را پوشش دهد. اجرای نهایی IMERG (IMERG-Final) که الگوریتمی از محصول GPM بوده در سه سطح منتشر می‌شود، سطح سوم از این محصول، تخمین‌های ماکروویو و مادون‌قرمز را از مجموعه

¹ Global Precipitation Climatology Centre

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های همدیدی استان گیلان

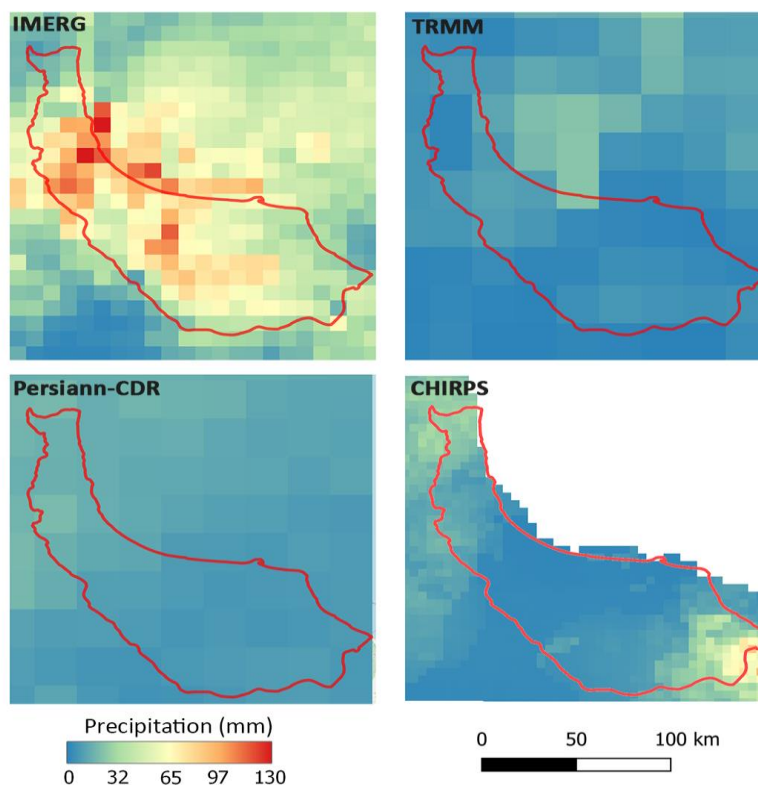
Table 2- Characteristics of synoptic stations in Gilan province

شماره	نام ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی (درجه اعشار)	طول جغرافیایی (درجه اعشار)
1	بندر انزلی	-23.6	37.479	49.457
2	رودبار	205	36.817	49.421
3	دیلمان	1447.6	36.885	49.910
4	چیرنده	1581.4	36.708	49.801
5	کیاشهر	-22	37.416	49.883
6	لاهیجان	34.2	37.194	50.016
7	منجیل	338.3	36.729	49.409
8	ماسوله	1081	37.150	48.983
9	رشت (کشاورزی)	24.8	37.202	49.645
10	آستارا	-21.1	38.365	48.854
11	تالش	7	37.839	48.896
12	رودسر	-22	37.124	50.324
13	رشت	-8.6	37.322	49.624

جدول ۳- مشخصات محصولات بارش ماهواره‌ای

Table 3- Characteristics of satellite precipitation products

نام محصول	بازه زمانی در دسترس	دقت زمانی (ساعت)	دقت مکانی (درجه)	آدرس دریافت داده‌ها
IMERG	2000-Present	0.5	0.1×0.1	https://gpm.nasa.gov/data/directory
CHIRPS	1981-Present	24	0.05×0.05	https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/
Pearsinn-CDR	1983-Present	24	0.25×0.25	https://www.ncei.noaa.gov/data/precipitation-persiann/access/
TRMM	1998-2019	3	0.25×0.25	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_7/summary



شکل ۲- نمونه‌ای از شبکه‌بندی هر محصول در منطقه مورد مطالعه برای یک رخداد
Figure 2- Sample of grid network for each crop in the case study for one event

در سال ۲۰۱۵، از طریق داده‌های GPCC و سامانه ارزیابی و نظارت اقلیمی (CAMS) برای ارائه یک مجموعه داده همگن با داده‌های GPM مجدداً پردازش شده و تا انتهای سال ۲۰۱۹ در دسترس قرار گرفت. این مطالعه روی محصول TMPA-3B42V7 تمرکز داشته که ارزیابی بارش‌های شدید از سال ۱۳۹۸-۱۳۹۶ را در بر می‌گیرد.

۲-۴- معیارهای ارزیابی عملکرد

برای ارزیابی عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای در برآورد رخدادهای بارشی سنگین و مقایسه آن‌ها با بارش‌های مشاهده‌ای ایستگاهی، از معیارهای قطعی که برگرفته از جدول توافقی ۲×۲ بود و معیارهای آماری پیوسته استفاده شد. در این مطالعه برای مقایسه بارش ماهواره‌ای با داده‌های مشاهده‌ای، پیکسلی انتخاب شد که ایستگاه زمینی در آن پیکسل از فایل شبکه‌بندی ماهواره‌ای قرار گرفته است. شایان ذکر است که ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای از طریق شاخص‌های قطعی و معیارهای آماری به صورت مقایسه روزانه از هر رخداد با داده ایستگاهی انجام شد، به نحوی که بارش‌های ماهواره‌ای به صورت تجمعی ۲۴ ساعته با داده‌های روزانه هر ایستگاه بررسی شد. شایان ذکر است برای بدست آوردن مقدار بارش ۲۴ ساعته محصولات IMERG و TRMM (که هر دو دقت زمانی کم‌تر از ۲۴ ساعت دارند)، مجموع بارش‌های ثبت شده در هر گام زمانی برای هر ۲۴ ساعت محاسبه شد.

۲-۴-۱- شاخص‌های قطعی

راستی آزمایی قطعی یا طبقه‌بندی شده، مطابقت بین وقوع مشاهدات و تخمین‌های ماهواره‌ای را در رویدادها ارزیابی می‌کند. شاخص‌های تعریف شده بر اساس جدول توافقی ۲×۲ از تعداد دفعات وقوع/عدم وقوع و تخمین/عدم تخمین بارش قابل محاسبه است (جدول ۴). در این مطالعه برای وقوع و عدم وقوع رخدادهای از آستانه ۵ میلی‌متر برای محاسبه شاخص‌های قطعی استفاده شد (Ghafarian, 2021; Zeyaeyan et al., 2017).

جدول ۴- جدول توافقی ۲×۲
Table 4- Contingency table 2×2

		مشاهدات		کل
		تعداد دفعات عدم وقوع	تعداد دفعات وقوع	
تعداد دفعات وقوع	پدیده	a	b	a+b
	پدیده	c	d	c+d
تعداد دفعات عدم وقوع		a+c	b+d	n=a+b+c+d
کل		a+c	b+d	n=a+b+c+d

۲-۳-۲- گروه مخاطرات اقلیمی بارش فروسرخ با داده ایستگاهی (CHIRPS)

CHIRPS یک پایگاه داده اقلیمی برای تخمین بارش است (Funk et al., 2014). الگوریتم این محصول سه نوع اطلاعات، اقلیم‌شناسی جهانی، تخمین‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی را برای تخمین بارش ادغام می‌کند. تفاوت اصلی این محصول با سایر پایگاه‌های تخمین بارش در این است که از بارش‌های ماهواره‌ای طولانی‌مدت برای استخراج سطوح اقلیمی زمین استفاده می‌کند که عملکرد آن را در مناطق کوهستانی بهبود می‌بخشد (Funk et al., 2015).

۲-۳-۳- تخمین بارش با اطلاعات سنجش از راه دور با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی-داده ثبت‌شده اقلیمی (PERSIANN-CDR)

الگوریتم PERSIANN-CDR از ۶۰ درجه جنوبی تا شمالی و ۰-۳۶۰ درجه طول جغرافیایی تخمین بارش ارائه می‌دهد. داده‌های بارش با دقت زمانی روزانه و وضوح مکانی ۰/۲۵ درجه از سال ۱۹۸۳ تاکنون در دسترس است. الگوریتم PERSIANN-CDR از الگوریتم PERSIANN به عنوان مدل اصلی خود استفاده می‌کند که تخمین‌های بارش را با استفاده از اطلاعات ترکیبی مادون قرمز (IR) و ماکروویو غیرفعال (PMW) از طریق ماهواره‌های چندگانه زمین آهنگ^۳ (GEO) و مدار پایین^۴ (LEO) انجام می‌دهد. PERSIANN-CDR با هدف دسترسی به مجموعه داده‌های جهانی بارش به صورت مداوم، بلند مدت، با وضوح مکانی بالا برای مطالعه تغییرات و روند بارش‌های روزانه، به ویژه رویدادهای شدید بارشی، ایجاد شده است (Ashouri et al., 2015).

۲-۳-۴- مأموریت اندازه‌گیری بارندگی حراری (TRMM)

TRMM مبتنی بر تجزیه و تحلیل بارش چند ماهواره‌ای (TMPA) و یک محصول تخمین بارش ماهواره‌ای است که توسط ناسا با همکاری آژانس اکتشافات هوافضای ژاپن (JAXA) توسعه یافته است. این محصول تخمین بارش را با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه در سطح جهانی (۵۰ درجه جنوبی تا شمالی) ارائه می‌دهد (Huffman et al., 2010). دو محصول مختلف از TRMM وجود دارد. TMPA-3B42RT، که محصولی با دسترسی آنی بوده و تا سال ۲۰۱۵ در دسترس است و مورد بعد TMPA-3B42V7 است که دوره زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۹ را پوشش می‌دهد. محصول 3B42RT بر اساس طیف ماکروویو غیرفعال و تخمین فروسرخ توسعه یافته بود. اما مجموعه داده‌های روزانه 3B42V7 بعد از متوقف شدن TRMM

¹ Infrared

² Passive Microwave

³ Geostationary Earth orbiting

⁴ Low Earth Orbit

⁵ Japan Aerospace Exploration Agency

- امتیاز مهارت هایدکه (HSS):

HSS بهبود جزئی تخمین را نسبت به تخمین استاندارد اندازه‌گیری می‌کند. «تخمین استاندارد» معمولاً عددی صحیح است که تصادفاً درست است یا نسبت درست به شانس را بیان می‌کند.

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{[(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)]} \quad (4)$$

مقدار صفر HSS مربوط به تخمینی است که هیچ مهارتی ندارد و تخمینی که همیشه درست است دارای HSS یک است و اگر تخمین بارش کمتر از نسبت چیزی که به‌طور تصادفی به‌دست می‌آید را نشان دهد، مقدار HSS منفی خواهد بود.

۲-۴-۲- معیارهای آماری پیوسته

برای ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای علاوه بر شاخص‌های قطعی ذکر شده از معیارهای آماری پیوسته ضریب همبستگی^۷ (Corr) و نرمال مجذور میانگین مربعات خطا (nRMSE) که به‌ترتیب در رابطه‌های ۵ و ۶ بیان شده است، استفاده شد.

$$Corr = \frac{\sum_{i=1}^t (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^t (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^t (S_i - \bar{S})^2}} \quad (5)$$

$$nRMSE = \frac{\left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (\theta_i')^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{O_{max} - O_{min}} \quad (6)$$

که در آن، $\theta_i' = S_i - O_i$ است که در آن S_i مقادیر بارش تخمینی از ماهواره‌ها و O_i مقادیر مشاهداتی ایستگاهی است. \bar{O} و \bar{S} به‌ترتیب میانگین مقادیر تخمینی و مشاهداتی بوده و t مجموع گام‌های زمانی است. O_{Max} و O_{Min} به‌ترتیب نشان‌دهنده کمترین و بیشترین مقادیر مشاهداتی است. محدوده عملکرد معیار Corr از ۱- تا ۱+ است که صفر به معنای عدم همبستگی و ۱+ به معنای همبستگی کامل و ۱- به معنای همبستگی مخالف است. محدوده عملکرد nRMSE از ۰ تا +∞ برحسب درصد متغیر است و کمترین مقدار یعنی صفر نشان‌دهنده کمترین خطا خواهد بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای با معیارهای قطعی نتایج ارزیابی عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای با معیارهای قطعی در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد شاخص PC، محصول TRMM در ایستگاه‌های ماسوله، دیلمان و رودبار امتیاز یکسانی با IMERG داشته و در دو ایستگاه

شاخص‌های قطعی استفاده شده شامل؛ نسبت صحیح (PC)، شاخص موفقیت بحرانی (CSI)، اریبی (B) و امتیاز مهارت هایدکه^۴ (HSS) است که هر یک در ادامه توضیح داده شده‌اند. تمام پارامترهای استفاده شده در شاخص‌های قطعی، در جدول ۴ تعریف شده است.

- نسبت صحیح (PC):

از نظر مفهومی برابر است با نسبت مجموع تخمین‌های صحیح به تعداد کل که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PC = \frac{a + d}{n} \quad (1)$$

این شاخص برای تخمین درست و عدم تخمین پدیده‌ها وزن یکسانی قائل می‌شود، به همین دلیل ممکن است در برخی موارد سنجه مناسبی برای اندازه‌گیری دقت پیش‌بینی‌ها نباشد. مقدار این شاخص همواره بین صفر برای بدترین و یک برای بهترین حالت متغیر است.

- شاخص موفقیت بحرانی (CSI):

این شاخص برای سنجش دقت به کار می‌رود. مطابق تعریف برابر است با نسبت تعداد مواردی که پدیده به‌درستی تخمین شده است به مجموع تعداد مواردی که پدیده مورد نظر رخ داده یا تخمین شده است:

$$CSI = \frac{a}{a + b + c} \quad (2)$$

مقدار این شاخص همانند شاخص PC بین صفر برای بدترین حالت و یک برای بهترین حالت به‌دست می‌آید. در واقع شاخص موفقیت بحرانی مشابه معیار نسبت صحیح است با این تفاوت که رخ ندادن پدیده و عدم تخمین آن (d) در نظر گرفته نشده است.

- شاخص کیفی اریبی (Bias):

اریبی مقدار سوگیری هر محصول را به سمت بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی تخمین‌ها نشان می‌دهد که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Bias = \frac{a + b}{a + c} \quad (3)$$

در تخمین‌های کاملاً درست مقدار اریبی برابر یک خواهد بود. مقادیر بیش‌تر و کم‌تر از یک به‌ترتیب مربوط به حالت‌های بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی می‌شود.

¹ Proportion Correct

² Critical Success Index

³ Bias

⁴ Heidke-Skill-Score

⁵ Overestimating

⁶ Underestimating

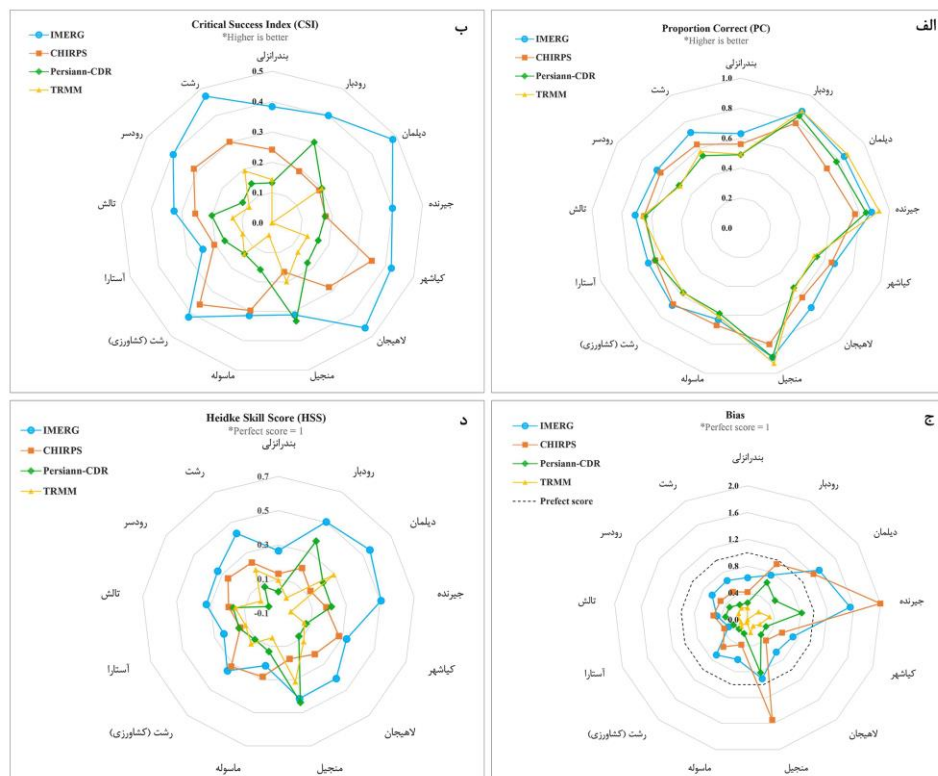
⁷ Correlation Coefficient

⁸ normalized Root Mean Square Error

نشان دادند. همچنین در بررسی ارتفاع ایستگاه‌ها و نتایج به‌دست‌آمده از این شاخص ارتباطی بین ارتفاع ایستگاه‌ها با عملکرد محصولات یافت نشد.

شاخص کیفی اریبی (Bias)، محصول ماهواره IMERG، در ۶۱ درصد از ایستگاه‌های زمینی، امتیاز مناسب‌تری نسبت به مابقی محصولات ماهواره‌ای کسب کرد. برآورد محصولات IMERG و CHIRPS در ایستگاه‌های جیرنده و دیلمان؛ همچنین برآورد CHIRPS فقط در ایستگاه منجیل، امتیاز بیش‌تر از یک را داشتند که نشان از بیش برآوردی تخمین بارش‌های سنگین در این ایستگاه‌هاست. علاوه بر این، IMERG در ایستگاه منجیل و CHIRPS در ایستگاه رودبار بهترین عملکرد را داشته‌اند که در واقع میانگین تخمین‌های ماهواره‌ای با میانگین مشاهدات در این ایستگاه‌ها برابری می‌کند. محصولات PERSIANN-CDR و TRMM در همه ایستگاه‌ها و محصولات IMERG و CHIRPS (به جز دو ایستگاه جیرنده و دیلمان)، برآوردها کم‌تر از مقدار بارش مشاهداتی را داشتند. در نهایت، نتایج میانگین ایستگاه‌ها مطابق شاخص اریبی محصولات IMERG، CHIRPS، PERSIANN-CDR و TRMM به ترتیب برابر امتیازات ۰/۷۶۱، ۰/۷۵۷، ۰/۳۹۶ و ۰/۱۵۴ بود.

جیرنده و منجیل با کمی اختلاف امتیاز عملکرد بهتری از مابقی محصولات ماهواره‌ای دارد. هشت ایستگاه (بندر انزلی، رشت، رودسر، تالش، آستارا، رشت-کشاورزی، کیشهر و لاهیجان) که همگی در ارتفاعی کم‌تر از ۴۰+ متری سطح آب‌های آزاد و نوار ساحلی دریای خزر قرار گرفته‌اند در شاخص PC محصول IMERG امتیاز بیش‌تری نسبت به سایر محصولات کسب کرده است. ضعیف‌ترین عملکرد در شاخص PC، مربوط به محصولات TRMM و PERSIANN-CDR بود که کم‌ترین امتیازات را به‌طور مشترک در هشت ایستگاه کسب کرده‌اند. در میانگین امتیاز ایستگاه‌ها (جدول ۴)، محصول IMERG در شاخص PC با امتیاز ۰/۷۳۸ بیش‌ترین امتیاز را داشت. همچنین محصولات CHIRPS، TRMM و PERSIANN-CDR به ترتیب امتیازات ۰/۶۷۵، ۰/۶۶۵ و ۰/۶۴۵ را کسب کردند. در شاخص CSI به‌وضوح مشخص است که در همه ایستگاه‌ها (به جز ایستگاه منجیل) محصول IMERG عملکرد بهتری دارد. در مجموع هر چهار محصول نتوانسته‌اند امتیاز قابل قبولی را در شاخص CSI کسب کنند، با توجه به میانگین امتیاز ایستگاه‌ها (جدول ۴) در شاخص CSI محصولات IMERG، CHIRPS، PERSIANN-CDR و TRMM به ترتیب با کسب امتیاز ۰/۳۸۷، ۰/۲۵۷، ۰/۱۸۵، ۰/۱۱۵، بهترین تا بدترین عملکرد را



شکل ۳- نتایج ارزیابی شاخص‌های قطعی؛ الف) PC، ب) CSI، ج) Bias و د) HSS برای هر ایستگاه

Figure 3- Evaluation results of deterministic indices; a) PC, b) CSI, c) Bias, and d) HSS for each station

TRMM به ترتیب همبستگی منفی و فاقد همبستگی با افزایش ارتفاع ایستگاه‌ها داشتند.

شکل ۵، روند تغییر دقت معیارهای آماری هر ایستگاه را در برابر ارتفاع ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۵-الف مربوط به معیار nRMSE، محصولات CHIRPS و IMERG همبستگی مثبتی با افزایش ارتفاع ایستگاه‌ها دارند. اما در محصولات PERSIANN-CDR و TRMM با افزایش ارتفاع مقدار nRMSE روند کاهشی دارد. در واقع با توجه به شکل ۵-الف، تجمع نقاط دو محصول PERSIANN-CDR و TRMM در خطای کم‌تر از ۳۵ درصد مشهود است که خطای کم‌تر این دو محصول را نسبت به محصولات IMERG و TRMM نشان می‌دهد. در شکل ۵-ب، همبستگی ایستگاه‌ها در محصولات PERSIANN-CDR، CHIRPS و IMERG با افزایش ارتفاع ایستگاه‌ها به‌طور جزئی افزایش می‌یابد. اما در TRMM با افزایش ارتفاع ایستگاه‌ها، همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و برآوردهای ماهواره‌ای روندی کاهشی را نشان می‌دهد.

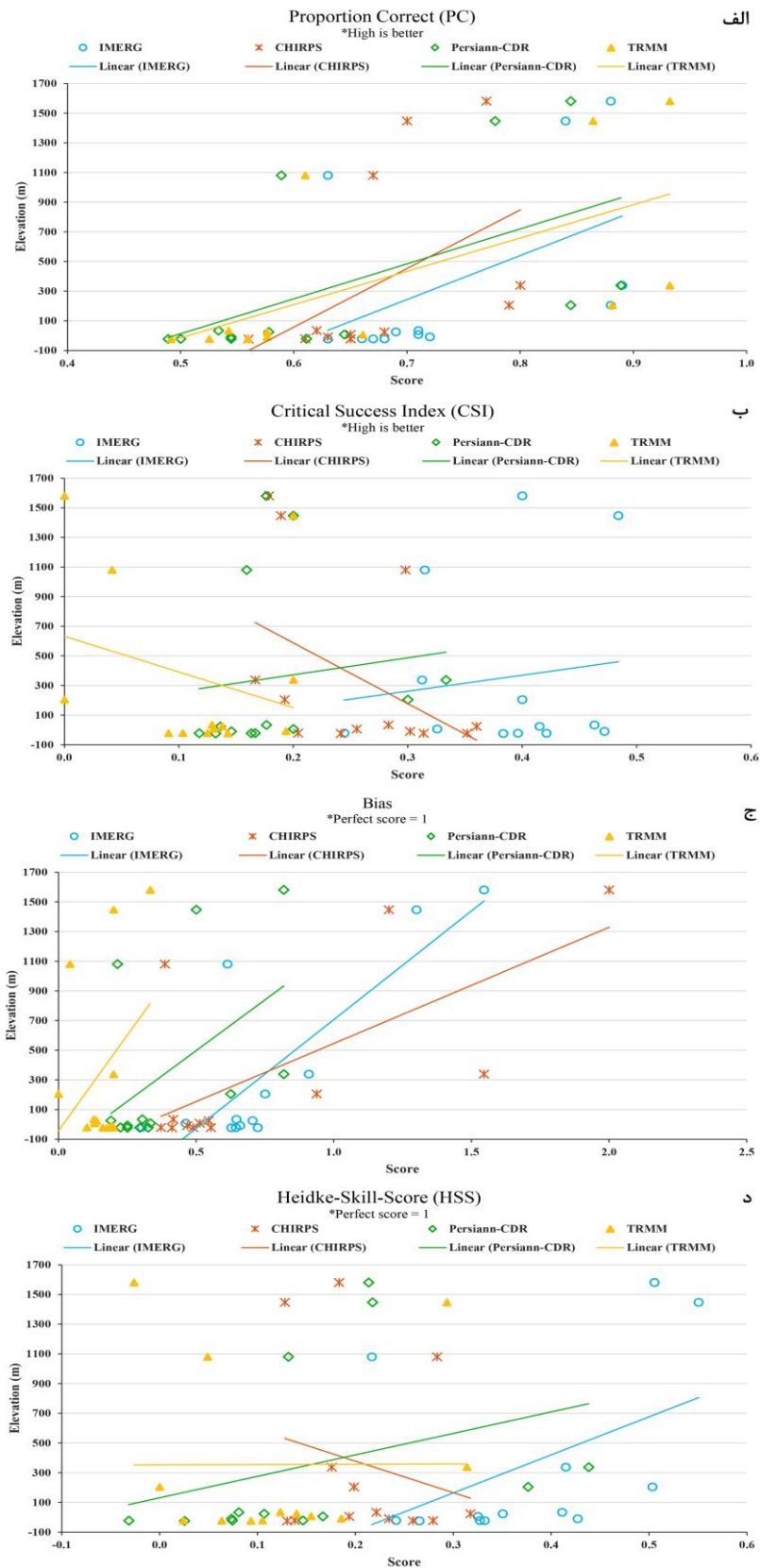
۳-۳- ارزیابی عملکرد محصولات بارش ماهواره‌ای با معیارهای آماری
با استفاده از معیارهای آماری ضریب همبستگی (Corr) و نرمال مجذور میانگین مربعات خطا (nRMSE)، تخمین رخدادهایی با بارش سنگین، برای هر چهار محصول در تمامی ایستگاه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۶-الف، نتایج ارزیابی معیار همبستگی برای هر ایستگاه را نشان می‌دهد. در محصول IMERG، از ۱۳ ایستگاه موجود در منطقه، هفت ایستگاه بالاترین همبستگی را در بین سایر محصولات به خود اختصاص دادند. همچنین از نظر میانگین همبستگی، محصول IMERG با کسب همبستگی ۰/۴۸، بهترین نتیجه را داشت. محصول TRMM، با کسب همبستگی بالاتری در پنج ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌ها و میانگین همبستگی ۰/۴۱، در رتبه دوم ارزیابی قرار گرفت. محصول PERSIANN-CDR در ایستگاه‌های رودسر، رودبار و جیرنده، همبستگی بیش‌تری از TRMM و کم‌تری نسبت به IMERG نشان داد و در ایستگاه ماسوله همبستگی بیش‌تری از IMERG و کم‌تری از TRMM را کسب کرد. در میانگین همبستگی، محصول PERSIANN-CDR با همبستگی ۰/۲۹ سومین جایگاه را به‌دست آورد. ضعیف‌ترین محصول در معیار همبستگی محصول CHIRPS بود که با میانگین ۰/۲۱ و هشت ایستگاه با کم‌ترین مقدار همبستگی، در رتبه چهارم قرار گرفت.

در شاخص HSS که بهترین امتیاز آن مقدار یک است، در همه ایستگاه‌ها به‌جز ماسوله، محصول IMERG امتیاز بیش‌تری را کسب کرد. CHIRPS در هشت ایستگاه (رشت، رودسر، تالش، ماسوله، رشت-کشاورزی، رودبار، لاهیجان و گیاشهر) و محصول PERSIANN-CDR در چهار ایستگاه (رودبار، منجیل، جیرنده و آستارا) بیش‌ترین امتیازات را کسب کردند. در ایستگاه‌های رودسر، بندر انزلی، دیلمان، لاهیجان و رشت-کشاورزی، محصول TRMM بهتر از محصول PERSIANN-CDR عملکرد داشت. در ارزیابی میانگین ایستگاه‌ها با شاخص HSS، به ترتیب محصولات CHIRPS، IMERG، PERSIANN-CDR و TRMM با کسب ۰/۳۷، ۰/۲۱، ۰/۱۵ و ۰/۱۱ در جایگاه‌های اول تا چهارم قرار گرفتند.

۳-۲- مقایسه عملکرد محصولات بر اساس ارتفاع هر ایستگاه

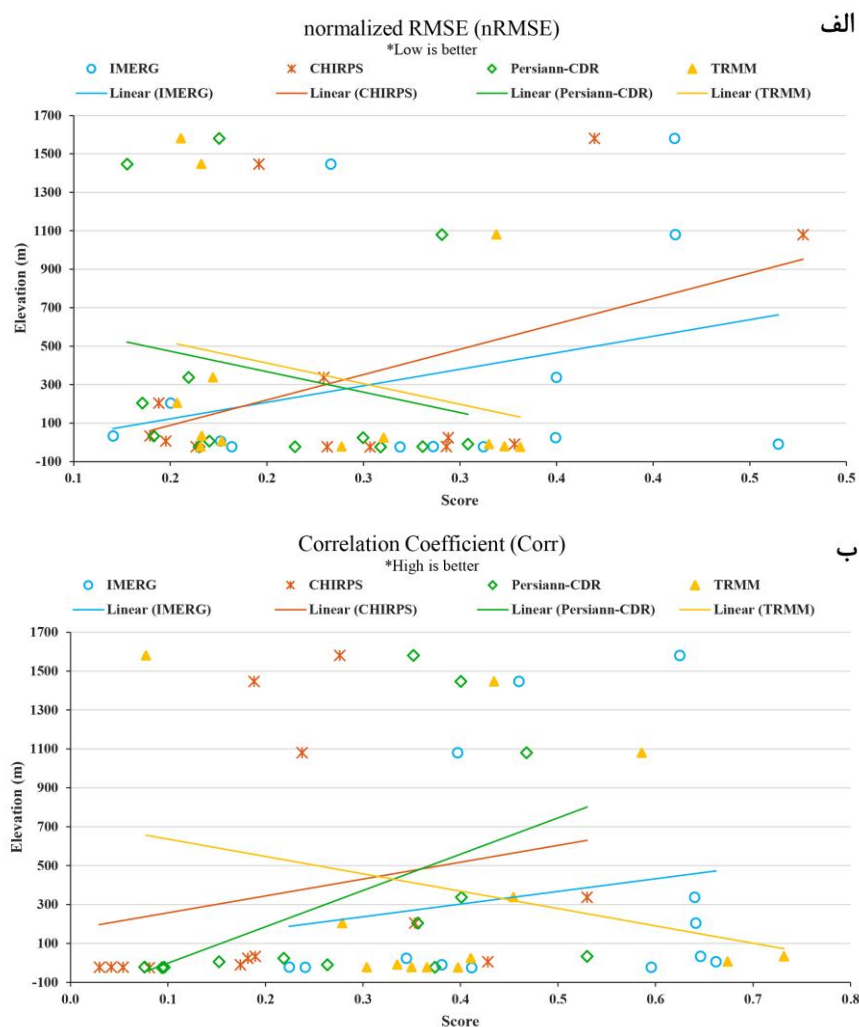
عملکرد محصولات ماهواره‌ای با شاخص‌های قطعی، در مقایسه با ارتفاع هر ایستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است. در این نمودارها، محور افقی امتیاز به‌دست آمده هر ایستگاه (بر اساس شاخص‌ها از نمودار ۴-الف الی ۴-د) و محور عمودی ارتفاع هر ایستگاه از سطح آب‌های آزاد، رسم شده است. همچنین برآورد هر محصول با نقاط و رنگ متفاوت و خطوط همبستگی جهت تشخیص رابطه بین ارتفاع ایستگاه‌ها و دقت شاخص‌ها رسم شده است. با توجه به شکل ۴-الف، همبستگی بین افزایش ارتفاع و افزایش دقت در شاخص PC در همه محصولات مثبت است. بیش‌ترین همبستگی با افزایش ارتفاع در شاخص PC مربوط به محصول TRMM است.

در شکل ۴-ج مربوط به شاخص Bias، روند افزایش ارتفاع با افزایش مقدار امتیاز مثبت است، اما به دلیل این که بهترین مقدار برای شاخص کیفی Bias، عدد یک است، باید گفت در محصولات IMERG و CHIRPS، سوگیری هر ایستگاه ارتباط مستقیمی با ارتفاع آن دارد. به طوری که با افزایش ارتفاع، تخمین بارش‌های سنگین در ایستگاه‌های مرتفع بیش‌برآورد شده است؛ برعکس در ایستگاه‌های کم ارتفاع‌تر بارش‌ها کم‌تر از میزان مشاهداتی برآورد شده‌اند که البته در محصولات PERSIANN-CDR و TRMM در همه ایستگاه‌ها بارش کم برآورد شده است. در شکل‌های ۴-ب و ۴-د به ترتیب مربوط به شاخص‌های CSI و HSS، دو محصول IMERG و PERSIANN-CDR همبستگی مثبت با افزایش ارتفاع ایستگاه‌ها نشان دادند. محصول CHIRPS در شاخص CSI و HSS، همبستگی منفی و محصول



شکل ۴- ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای با شاخص‌های قطعی در مقایسه با ارتفاع ایستگاه‌ها؛ الف) ارتفاع در برابر شاخص PC، ب) ارتفاع در برابر شاخص CSI، ج) ارتفاع در برابر شاخص Bias و د) ارتفاع در برابر شاخص HSS

Figure 4- Evaluation of products with definitive indicators compared to the height of the stations; A) PC versus elevation, B) CSI versus elevation, C) Bias versus elevation and D) HSS versus elevation



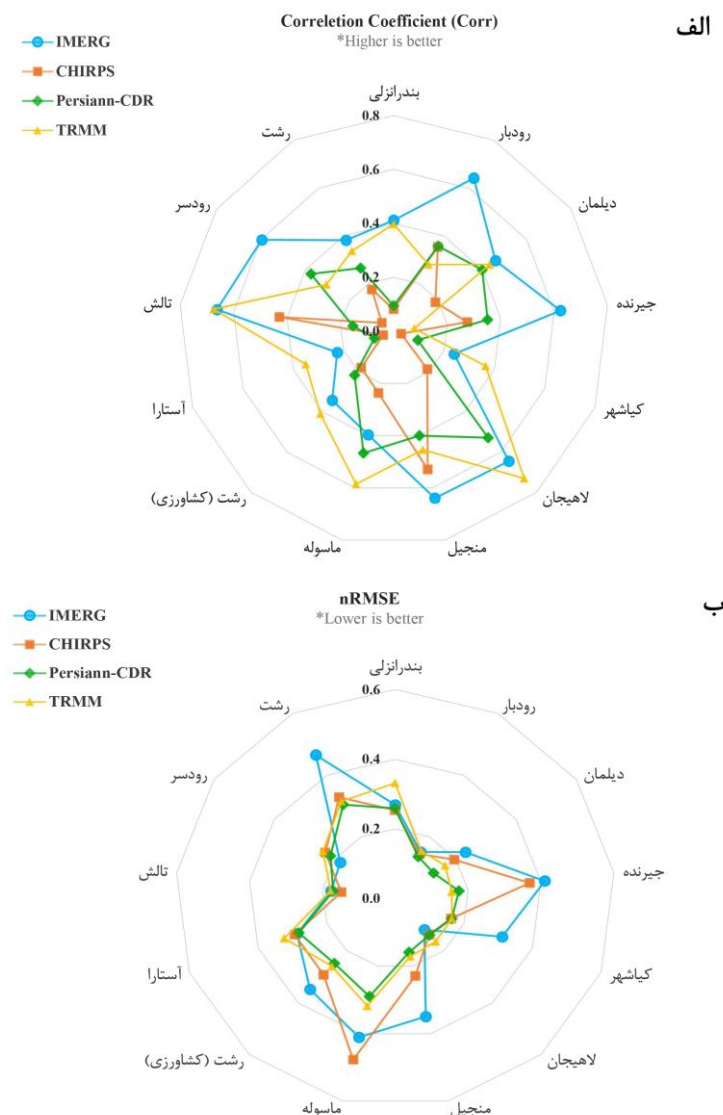
شکل ۵- ارزیابی محصولات با معیارهای آماری؛ الف) nRMSE و ب) ضریب همبستگی در مقابل ارتفاع ایستگاهها

Figure 5- Evaluation of products with statistical criteria; a) nRMSE and b) correlation coefficient versus stations elevation

در میانگین معیار nRMSE به PERSIANN-CDR تعلق گرفت (جدول ۴).

در نهایت جدول ۵، میانگین نتایج ارزیابی ایستگاهها برای هر چهار محصول را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، محصول IMERG در همه موارد به جز معیار nRMSE بهترین مقدار را به دست آورده و محصول PERSIANN-CDR کمترین خطا را در این معیار کسب کرده است. بر اساس این تفاوت در نتایج معیار nRMSE نسبت به سایر شاخصها و معیار همبستگی، از آزمون دانکن برای بررسی معناداری میانگینهای این معیار استفاده شد. نتایج آزمون دانکن در سطح ۵ درصد، اختلاف معناداری بین میانگین nRMSE محصولات نشان نداد.

با توجه به شکل ۶-ب، بیشترین خطاهای ایستگاهی به دست آمده از معیار nRMSE به ترتیب با ۴۷ و ۴۶ درصد نسبت به مقدار مشاهداتی، در محصولات CHIRPS و IMERG (ایستگاههای ماسوله و رشت) ثبت شده است. بر خلاف نتایج معیار همبستگی و شاخصهای قطعی، IMERG بیشترین خطا را در معیار nRMSE داشت، به طوری که میانگین خطای همه ایستگاهها در این محصول برابر با ۲۸ درصد بود. خطای محصولات TRMM و PERSIANN-CDR در تمامی ایستگاهها (به جز در ایستگاههای بندر انزلی و دیلمان) بسیار نزدیک به هم بود. به ترتیب میانگین خطای محصولات CHIRPS، TRMM و PERSIANN-CDR برابر ۲۵، ۲۲ و ۲۰ درصد به دست آمد. بر این اساس جایگاه دقیقترین محصول



شکل ۶- نتایج ارزیابی ایستگاه‌ها برای هر محصول با معیارهای پیوسته؛ الف) ضریب همبستگی و ب) nRMSE
Figure 6- Evaluation results of stations for each product with continuous criteria: a) correlation coefficient and b) nRMSE criteria

Moazami et al. (2016), Tan et al. (2018), (2021) و Sharifi et al. (2016) و Javanmard et al. (2010) به کم‌برآوردی بارش شدید توسط محصولات بارش ماهواره‌ای اشاره شده که در این پژوهش نیز این مسئله تایید شده است (به جز در ایستگاه‌های مرتفع). از طرفی برتری محصول IMERG در مقایسه با محصولات ماهواره‌ای دیگر در مطالعات Yu et al. (2022), Hamza et al. (2020), Tan et al. (2018) و Sharifi et al. (2016) تایید شده است.

۴- نتیجه‌گیری

بارش می‌تواند به‌عنوان اصلی‌ترین عامل در وقوع سیل‌های مخرب نقش ایفا کرده که تخمین و برآورد دقیق از مقدار آن در مدیریت منابع آب و مدیریت بحران به‌ویژه در مناطق سیل‌خیز،

جدول ۶ جزئیات آزمون دانکن را نشان می‌دهد. مطابق این جدول محصولات به یک گروه تقسیم شده‌اند که نشان می‌دهد اختلاف معناداری وجود ندارد و نمی‌توان به‌صورت منفرد با نتایج معیار nRMSE تصمیم‌گیری کرد. در نتیجه با چشم‌پوشی از نتایج معیار nRMSE، محصول IMERG در جایگاه اول قرار می‌گیرد و محصولات CHIRPS، PERSIANN-CDR و TRMM به‌ترتیب در جایگاه‌های دوم، سوم و چهارم قرار می‌گیرند. همچنین، نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که بین ارتفاع ایستگاه‌ها و برآوردهای ماهواره‌ای همبستگی وجود دارد. به‌طوری که در مطالعاتی که توسط Yu et al. (2022)، Qureshi et al. (2021)، Hamza et al. (2020) و Saeidizand et al. (2016) انجام شده به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. در مطالعات Yu et al. (2022)، Qureshi et al.

امری حیاتی تلقی می‌شود. از جدیدترین روش‌ها برای برآورد مقدار کمی بارش، استفاده از سامانه‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی است. بر همین اساس، در این مطالعه، برای برآورد بارش‌های سنگین و سیل‌آسا در نوار ساحلی دریای خزر (استان گیلان) از چهار محصول بارش ماهواره‌ای IMERG، CHIRPS،

امری حیاتی تلقی می‌شود. از جدیدترین روش‌ها برای برآورد مقدار کمی بارش، استفاده از سامانه‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی است. بر همین اساس، در این مطالعه، برای برآورد بارش‌های سنگین و سیل‌آسا در نوار ساحلی دریای خزر (استان گیلان) از چهار محصول بارش ماهواره‌ای IMERG، CHIRPS،

جدول ۵- میانگین شاخص‌های قطعی و معیارهای آماری برای هر محصول بارش ماهواره‌ای

Table 5- Average of deterministic indices and statistical criteria for each satellite precipitation product

نام محصول	PC	CSI	Bias	HSS	Corr	nRMSE (%)
GPM-IMERG	0.73	0.38	0.76	0.37	0.48	28.5
CHIRPS	0.67	0.25	0.75	0.21	0.21	25.1
PERSIANN-CDR	0.64	0.18	0.39	0.15	0.29	20.5
TRMM-3B42	0.66	0.11	0.15	0.11	0.41	22.6

جدول ۶- نتایج آزمون دانکن

Table 6- Results of Duncan test

نام محصول	تعداد ایستگاه	زیرگروه ۱ (میانگین nRMSE)
GPM-IMERG	13	28.5
CHIRPS	13	25.1
PERSIANN-CDR	13	20.5
TRMM	13	22.6
Sig.	-	0.188

* Uses Harmonic Mean Sample Size = 13

** Alpha = 0.05

ارزیابی میانگین ایستگاه‌ها با معیارهای آماری، جایگاه محصولات در معیار Corr به ترتیب IMERG، TRMM، PERSIANN-CDR و CHIRPS و در معیار nRMSE به ترتیب TRMM، PERSIANN-CDR، CHIRPS و IMERG به دست آمد. با توجه به نتایج حاصله، محصول IMERG در همه شاخص‌های قطعی و معیار همبستگی نسبت به سه محصول دیگر بهتر عمل کرده است. در نهایت، جهت ارزیابی و تحلیل بارش‌های سنگین در محدوده نوار ساحلی استان گیلان و مطالعات مرتبط با برآورد بارش، پیشنهاد می‌شود محصول IMERG در اولویت استفاده قرار گیرد. تحلیل انجام شده در این مطالعه، از مجموعه پایگاه‌های بارش ماهواره‌ای در تخمین رویدادهای شدید در مناطق ساحلی، با عدم قطعیت‌هایی مثل خطا در اندازه‌گیری داده‌های مشاهده‌ای، تراکم کم ایستگاه‌های مشاهده‌ای، استفاده از یک آستانه در ارزیابی با شاخص‌های قطعی، عدم نظر گرفتن نوع سامانه‌های بارشی در ارزیابی‌ها همراه بود که پیشنهاد می‌شود برای بررسی در پژوهش‌های آتی مد نظر قرار گیرند.

نتایج نشان داد که به جز ایستگاه‌های جیرنده، دیلمان و منجیل در دو محصول IMERG و CHIRPS، در مابقی ایستگاه‌ها، بارش کم‌تر از میزان مشاهداتی برآورد شده است. محصولات IMERG و PERSIANN-CDR در همه شاخص‌های قطعی، با همبستگی‌های مثبت بیش‌ترین تأثیرپذیری را در برآورد بارش‌های شدید با تغییر در ارتفاع ایستگاه‌ها داشتند. در معیارهای آماری این روند هم‌چنین برای محصولات IMERG و CHIRPS تکرار شد. مقایسه نتایج معیارها و شاخص‌ها در اکثر محصولات نشان داد که تغییرات ارتفاعی در برآورد بارش تأثیرگذار است. به طوری که بارش در ایستگاه‌های مرتفع نسبت به ایستگاه‌های واقع شده در نوار ساحلی دریای خزر، دقیق‌تر برآورد شده است. ارزیابی میانگین ایستگاه‌ها با شاخص‌های قطعی، جایگاه محصولات را از بهترین به بدترین به شرح زیر نشان داد:

در شاخص PC: IMERG، CHIRPS، TRMM و PERSIANN-CDR؛ در شاخص CSI: IMERG، CHIRPS، PERSIANN-CDR و TRMM؛ در شاخص Bias: IMERG، CHIRPS، PERSIANN-CDR و TRMM؛ و در شاخص HSS: IMERG، CHIRPS، TRMM و PERSIANN-CDR.

منابع

- قربشی قره‌تیکان، ک.، قره‌چلو، س.، محجوبی، ع.، گلپان، س.، و صالحی، ح. (۱۴۰۰). ارزیابی منابع آب سطحی قابل دسترس در حوضه مرزی قره‌تیکان با استفاده از محصولات ماهواره‌ای و GIS. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۱)، ۱-۱۳.
- محمدرضایی، م.، سلطانی، س.، و مدرس، ر. (۱۴۰۱). تأثیر شاخص‌های دمایی انسو بر خشکسالی هواشناسی در نیمه غربی ایران. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۱۳-۲۷.
- حجازی‌زاده، ز.، اکبری، م.، ساسانیپور، ف.، حسینی، ع.، و محمدی، ن. (۱۴۰۱). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر بارش‌های سیل‌آسا در استان تهران. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۸۷-۱۰۵.
- رحیمیانی ایرانشاهی، ح.، مرادی، ح.، و جلیلی، خ. (۱۴۰۰). روند تغییرات بارش و دما در مقیاس‌های زمانی مختلف در حوزه آبخیز کرخه. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۲)، ۱-۱۲.
- Sea lake-effect snow. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 94, 101219.
- Ghajarnia, N., Daneshkar Arasteh, P., Liaghat, M., & Araghinejad, S. (2018). Error analysis on PERSIANN precipitation estimations: Case study of Urmia Lake Basin, Iran. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(6), 05018006.
- Ghoreishi Gharetikan, S., Gharechelou, S., Mahjoobi, E., Golian, S., Salehi, H. (2021). Evaluation of available surface water resources in Qarah Tikan border basin using satellite products and GIS. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(1), 1-13 (in Persian).
- Hamza, A., Anjum, M.N., Masud Cheema, M.J., Chen, X., Afzal, A., Azam, M., Kamran Shafi, M., & Gulakhmadov, A. (2020). Assessment of IMERG-V06, TRMM-3B42V7, SM2RAIN-ASCAT, and PERSIANN-CDR precipitation products over the Hindu Kush Mountains of Pakistan, South Asia. *Remote Sensing*, 12(23), 3871.
- Hejazizadeh, Z., Akbari, M., Sasanpour, F., Hosseini, A., & Mohammadi, N. (2022). Investigating the effects of climate change on torrential rains in Tehran province. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(2), 87-105 (in Persian).
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., & Nelkin, E.J. (2010). The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). Pp. 3-22, In: *Satellite rainfall applications for surface hydrology*. Springer, Dordrecht.
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., & Tan, J. (2015). Integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) technical documentation. *Nasa/Gsfc Code*, 612(47), 2019.
- IPCC, (2021). climate change 2021: The physical science basis. IPCC sixth Assessment Report.
- Javanmard, S., Yatagai, A., Nodzu, M.I., BodaghJamali, J., & Kawamoto, H. (2010). Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Iran. *Advances in Geosciences*, 25, 119-125.
- Kiany, M.S.K., Masoodian, S.A., Balling Jr, R.C., & Montazeri, M. (2020). Evaluation of the TRMM 3B42 product for extreme precipitation analysis over southwestern Iran. *Advances in Space Research*, 66(9), 2094-2112.
- Agarwal, A., Marwan, N., Maheswaran, R., Ozturk, U., Kurths, J., & Merz, B. (2020). Optimal design of hydrometric station networks based on complex network analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2235-2251.
- Alijanian, M., Rakhshandehroo, G.R., Mishra, A. K., & Dehghani, M. (2017). Evaluation of satellite rainfall climatology using CMORPH, PERSIANN-CDR, PERSIANN, TRMM, MSWEP over Iran. *International Journal of Climatology*, 37(14), 4896-4914.
- Ashouri, H., Hsu, K.L., 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(1), 69-83.
- Behzadi, J. (2017). Monitoring wet and dry process using precipitation changes. *Water Harvesting Research*, 2(2), 39-46.
- Conti, F.L., Hsu, K.L., Noto, L.V., & Sorooshian, S. (2014). Evaluation and comparison of satellite precipitation estimates with reference to a local area in the Mediterranean Sea. *Atmospheric Research*, 138, 189-204.
- Darand, M., Amanollahi, J., & Zandkarimi, S. (2017). Evaluation of the performance of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) estimation over Iran. *Atmospheric Research*, 190, 121-127.
- Funk, C.C., Peterson, P.J., Landsfeld, M.F., Pedreros, D.H., Verdin, J.P., Rowland, J.D., Romero, B.E., Husak, G.J., Michaelsen, J.C., & Verdin, A.P. (2014). A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. *US Geological Survey Data Series*, 832(4), 1-12.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations- A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1-21.
- Ghafarian, P. (2021). Impact of physical parameterizations on simulation of the Caspian

- Kidd, C., Bauer, P., Turk, J., Huffman, G.J., Joyce, R., Hsu, K.L., & Braithwaite, D. (2012). Intercomparison of high-resolution precipitation products over northwest Europe. *Journal of Hydrometeorology*, 13(1), 67-83.
- Mahbod, M., Shirvani, A., & Veronesi, F. (2019). A comparative analysis of the precipitation extremes obtained from tropical rainfall-measuring mission satellite and rain gauges datasets over a semiarid region. *International Journal of Climatology*, 39(1), 495-515.
- Moazami, S., Golian, S., Hong, Y., Sheng, C., & Kavianpour, M.R. (2016). Comprehensive evaluation of four high-resolution satellite precipitation products under diverse climate conditions in Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 420-440.
- Mohammadrezaei, M., Soltani, S., & Modarres, R. (2022). Effect of Enso indices on meteorological drought in the midwest of Iran. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(2), 13-27 (in Persian).
- Qureshi, S., Koohpayma, J., Firozjaei, M.K., & Kakroodi, A.A. (2021). Evaluation of seasonal, drought, and wet condition effects on performance of satellite-based precipitation data over different climatic conditions in Iran. *Remote Sensing*, 14(1), 76.
- Rahimiani Iranshahi, H., Moradi, H., & Jalili, K. (2022). Trend of precipitation and temperature changes at different time scales in the Karkheh Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(2), 1-12 (in Persian).
- Saeidizand, R., Sabetghadam, S., Tarnavsky, E., & Pierleoni, A. (2018). Evaluation of CHIRPS rainfall estimates over Iran. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 282-291.
- Samer, A.S., Magdalena, B., Tara, B., David, E., Deon, F., Märt, K., Halsey, R., Shwetlena, S., Alexandria, V. (2018). World Development Report 2018: Learning to realize education's promise. Final report, The World Bank Group.
- Sharifi, E., Steinacker, R., & Saghafian, B. (2016). Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results. *Remote Sensing*, 8(2), 135.
- Sohn, B.J., Han, H.J., & Seo, E.K. (2010). Validation of satellite-based high-resolution rainfall products over the Korean Peninsula using data from a dense rain gauge network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(4), 701-714.
- Tan, M.L., & Santo, H. (2018). Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia. *Atmospheric Research*, 202, 63-76.
- Yeditha, P.K., Kasi, V., Rathinasamy, M., & Agarwal, A. (2020). Forecasting of extreme flood events using different satellite precipitation products and wavelet-based machine learning methods. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 30(6), 063115.
- Yu, L., Leng, G., & Python, A. (2022). A comprehensive validation for GPM IMERG precipitation products to detect extremes and drought over mainland China. *Weather and Climate Extremes*, 36, 100458.
- Zeyaeyan, S., Fattahi, E., Ranjbar SaadatAbadi, A., Azadi, M., & Vazifedoust, M. (2017). Evaluating the effect of physics schemes in WRF simulations of summer rainfall in north west Iran. *Climate*, 5(3), 48.