

Research Paper

Evaluation and Bias Correction of Satellite Precipitation Products Using Copula Functions and Meta-Hunting Algorithms

Ruhollah Kazemi Arpanahi¹, Heydar Zarei^{2*}, Farshad Ahmadi³, Mohammad Amin Maddah⁴

¹PhD student in Hydrology and Water Resources Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

²Professor Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

³ Associate Professor Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

⁴ Assistant Professor Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

[10.22125/iwe.2025.514687.1874](https://doi.org/10.22125/iwe.2025.514687.1874)

Received:
April 1, 2025
Accepted:
November 9, 2025
Available online:
December 25, 2025

Keywords:

Remote sensing, GPM satellite, optimization algorithms, uncertainty

Abstract

Providing data related to atmospheric precipitation is of vital importance in hydrometeorological assessments at the basin level. On the other hand, access to ground data is often limited, so the use of estimated precipitation data by satellite is more important. Due to indirect measurement and the nature of remote sensing, satellite products have systematic errors compared to ground station data, which need to be evaluated at each location. Therefore, in this study, the efficiency of GPM satellite precipitation products and the error and bias correction of this satellite data were investigated. In this study, to estimate the amount of precipitation, daily precipitation data from GPM satellite precipitation and data from 27 synoptic stations of the Greater Karun basin were evaluated in the period from 2014 to 2019. To correct the bias of GPM satellite precipitation, Frank and Clayton detailed functions were used, the dependence parameter of these functions was calculated using PSO, HO and TSA algorithms. To evaluate the results, Bias, RBias, RMSE, CC, POD, CSI, and FAR statistics were used. The results showed that the GPM satellite estimates the amount of precipitation at lower altitudes more accurately than at higher altitudes, and the Clayton copula function with the dependency parameter calculated using the PSO meta-heuristic algorithm had better results than other algorithms used to correct the error and bias of the GPM satellite precipitation products with a 13.1% improvement in Bias, a 14.3% improvement in RMSE, and a 22.2% improvement in CC.

1. Introduction

High-quality satellite precipitation product estimates provide a useful source of data for hydrological applications and water resources planning, especially in developing regions that lack ground stations or have irregularly distributed station networks. However, satellite precipitation product estimates are subject to errors and biases relative to ground-based precipitation stations due to the nature of indirect measurements. On the other hand, high-accuracy precipitation estimates are essential for hydrologists, because the bias associated with satellite precipitation product estimates will be propagated to other hydrological variables. Many studies have been conducted to evaluate satellite precipitation algorithms

* **Corresponding Author:** Heydar Zarei

Address: Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
Email: zareih@scu.ac.ir
Tel: 061- 33330635

in different regions of the world, some of which used different methods to correct the error of satellite products, but the error and bias of remote sensing satellite data have not yet been calibrated to an acceptable level; Therefore, in this study, Archimedean copula functions were used to correct the satellite precipitation bias.

2. Materials and Methods

In this study, satellite precipitation images of 100 specific precipitation days of the GPM satellite, which is hereinafter called satellite precipitation, were prepared during the years 2014 to 2019, and satellite precipitation cells at the locations of 27 synoptic stations in the study area were extracted and examined. Copula functions were used to correct the bias of satellite precipitation. In general, copula is a flexible mathematical technique that connects a set of univariate marginal cumulative probability functions to each other and produces a multivariate cumulative probability function. To calculate the dependency parameter of the copula function, several methods such as moment, canonical maximum likelihood (CML), maximum likelihood (MLM), rational function method for margins (IFM) and optimization algorithm methods (metaheuristics), each of which has several disadvantages and advantages, can be used. In this research, the parameters of the detailed function were optimized using TSA, PSO, and HO meta-heuristic algorithms, and various evaluation indices including Bias, RBias, RMSE, CC, POD, CSI, and FAR were used for validation.

3. Results

estimating precipitation is better for lower altitudes. However, regarding the estimation of the occurrence or non-occurrence of precipitation, the POD, CSI, and FAR statistics were used, and it was found that the GPM satellite has more accuracy in estimating the occurrence or non-occurrence of rain at higher altitudes. Due to the indirect measurement of the precipitation phenomenon, the GPM satellite precipitation products have errors and bias compared to rain measurement stations. To correct the bias of the GPM satellite precipitation, the Clayton and Frank copula functions were used, and the dependence parameter of the copula functions was calculated using the PSO, HO, and TSA meta-exploration algorithms. After evaluating the data corrected by the copula functions, it was found that the Clayton copula function with the optimized dependence parameter using the PSO meta-exploration algorithm had better results than other algorithms. Considering the percentage of improvement in the statistics used presented in Table (4), the results of this study are consistent with the results of research by Moazami et al (2017) and Mokhtari et al (2021).

4. Discussion and Conclusion

In order to use remote sensing data in hydrological models, it is essential to evaluate and correct data bias. In this study, satellite precipitation products, GPM satellite were evaluated in the study area of the Greater Karun Basin. The trend of changes in Bias, RMSE and CC statistics with increasing altitude above sea level of the rainfall stations was evaluated, it was observed that the Bias value increased up to 1500 meters, and at altitudes above 1500 meters, the bias value decreased with increasing altitude. The RMSE value increased with increasing altitude and the CC value decreased with increasing altitude. The trend of changes in POD, CSI and FAR statistics with increasing altitude of the rainfall stations was evaluated, it was observed that the POD and CSI statistics increased with increasing altitude and the FAR statistic decreased, in other words, the GPM satellite is more accurate in estimating the occurrence or absence of rain at higher altitudes. 3. Discussion and Conclusions: Clayton and Frank copula functions were used to correct the satellite precipitation bias and it was observed that the copula function optimized with the PSO meta-heuristic algorithm had better results than other algorithms with a 13.1% improvement in Bias, a 14.3% improvement in RMSE, and a 22.2% improvement in CC.

5. Six important references

- 1) Moazami, S. Golian, S. ۲۰۱۷. ENSEMBLE-BASED MULTIVARIATE SENSITIVITY ANALYSIS OF SATELLITE RAINFALL ESTIMATES USING COPULA MODEL. Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling.
- 2) Abdallah, M. Zhang, K. Chao, L. Omer, A. Hassaballah, Kh. Reda, K. W. Liu, L. Tola, T. L. Nour, O, M. 2023. A D-vine copula-based quantile regression towards merging satellite

precipitation products over a rugged topography at the upper Tekeze Atbara Basin of the Nile Basin. Hydrology and Earth System Sciences.

- 3) Kennedy, J. and Eberhart, R.1995. Particle swarm optimization (PSO). In Proc. IEEE International Conference on Neural Networks. Perth. Australia 1942-1948.
- 4) M, H, Amiri. N, Mehrabi Hashjin. M, Montazeri. S, Mirjalili. N, Khodadadi. 2024. Hippopotamus optimization algorithm: a novel nature-inspired optimization algorithm. Scientific Reports.
- 5) Sklar A., 1959. Fonctions de Répartition à n Dimensions et Leurs Marges, vol. 8. Publications de l'Institut de Statistique de L'Université de Paris; 229–231.
- 6) Satnam, Kaur. Lalit K, Awasthi. A L, Sangal. Gaurav, Dhiman.2020. Tunicate Swarm Algorithm: A new bio-inspired based metaheuristic paradigm for global optimization. Journal Elsevier,



ارزیابی و اصلاح آریبی محصولات بارش ماهواره‌ای با استفاده از توابع مفصل و الگوریتم‌های فراکاوشی

روح الله کاظمی آرپناهی^۱، حیدر زارعی^۲، فرشاد احمدی^۳، محمد امین مداح^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸

مقاله پژوهشی

چکیده

تامین داده‌های مرتبط با ریزش‌های جوی از اهمیت حیاتی در ارزیابی‌های هیدرومتئورولوژیک در سطح حوضه آبریز برخوردارند. از طرفی دسترسی به داده‌های زمینی در بسیاری مواقع محدود بوده از این رو کاربرد داده‌های بارش برآوردی توسط ماهواره اهمیت بیشتری می‌یابد. به دلیل اندازه‌گیری غیرمستقیم و ماهیت سنجش‌ازدور، محصولات ماهواره‌ای نسبت به داده‌های ایستگاه‌های زمینی دارای خطا نظام مند است که در هر مکان لازم است مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین در این پژوهش کارایی محصولات بارش ماهواره GPM و اصلاح خطا و آریبی داده‌های این ماهواره مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق جهت تخمین میزان بارش، داده‌های بارش روزانه بارش ماهواره GPM و داده‌های ۲۷ ایستگاه سینوپتیک حوضه آبریز کارون بزرگ در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت اصلاح آریبی بارش ماهواره GPM از توابع مفصل فرانک و کلایتون که پارامتر وابستگی این توابع با استفاده از الگوریتم‌های PSO، HO، TSA و محاسبه شده، مورد استفاده قرار گرفت. جهت ارزیابی نتایج، از آماره‌های Bias، RBias، RMSE، CC، POD، CSI و FAR استفاده شد. نتایج نشان داد ماهواره GPM مقدار بارش در ارتفاعات پایین‌تر را نسبت به مناطق مرتفع بادقت بهتری برآورد می‌کند و تابع مفصل کلایتون با پارامتر وابستگی محاسبه شده با استفاده از الگوریتم فرا کاوشی PSO با ۱۳/۱ درصد بهبود مقدار Bias، ۱۴/۳ درصد بهبود مقدار RMSE و ۲۲/۲ درصد بهبود مقدار CC نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد استفاده جهت اصلاح خطا و آریبی محصولات بارش ماهواره GPM داشته است.

کلیدواژه: سنجش‌ازدور، ماهواره GPM، الگوریتم‌های بهینه‌یابی، عدم قطعیت

^۱ دانشجوی مقطع دکتری مهندسی هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

kazemi_rohollah@yahoo.com

^۲ استاد گروه منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. zareih@scu.ac.ir

^۳ دانشیار گروه منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. f.ahmadi@scu.ac.ir

^۴ استادیار گروه منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. ma.maddah@scu.ac.ir

مقدمه

تخمین‌های محصولات بارش ماهواره‌ای باکیفیت بالا منبع مفیدی از داده‌ها برای کاربردهای هیدرولوژیکی و برنامه‌ریزی منابع آب، به‌ویژه در مناطق درحال توسعه که فاقد ایستگاه‌های زمینی یا شبکه ایستگاه‌های با پراکندگی نامنظم است، فراهم می‌کند. با این حال، تخمین‌های محصولات بارش ماهواره‌ای به دلیل ماهیت اندازه‌گیری غیرمستقیم دارای خطا و اریبی نسبت به ایستگاه‌های بارش زمینی است. از سوی دیگر، تخمین بارش بادقت بالا برای هیدرولوژیست‌ها بسیار ضروری است، زیرا اریبی مرتبط با تخمین‌های محصولات بارش ماهواره‌ای در سایر متغیرهای هیدرولوژیکی انتشار خواهند یافت.

مطالعات زیادی جهت ارزیابی الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای در مناطق مختلف جهان انجام شده است که بعضاً از روش‌های مختلفی جهت اصلاح خطای محصولات ماهواره‌ای استفاده کردند، ولی خطا و اریبی داده‌های ماهواره‌های سنجنش‌ازدور هنوز در حد قابل قبولی و اسنجی نشده است؛ بنابراین در این تحقیق از توابع مفصل ارشمیدسی جهت اصلاح اریبی بارش ماهواره‌ای استفاده شد.

آقا کوچک (۲۰۱۰) به منظور بررسی عملکرد تابع مفصل در تصحیح خطای بارش رادار، بارش رادار و بارش مشاهده‌ای یک حوضه کوچک در می‌سی‌سی‌پی ایالات متحده و یک حوضه بزرگ در اوکلاهما ایالات متحده را مورد بررسی و ارزیابی قرار داد، به طور کلی به این نتیجه رسید که مدل t -copula برای تحقیقات آینده می‌تواند امیدوارکننده باشد. بی‌تیو و گبرمایکل^۱ (۲۰۱۱) در حوضه آریز بررسان^۲ در اتیوپی، الگوریتم‌های PERSIANN-CCS و CMORPH را مورد ارزیابی قرار دادند و بترتیب خطاهای ۳۲ و ۴۹ درصد در برآورد بارش مشاهده کردند. کتیرایی بروجردی و همکاران (۲۰۱۳) الگوریتم‌های

CMORPH، PERSIANN و TRMM-3B42 را برای مناطق ایران ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم‌های TRMM و PERSIANN در نواحی کوه‌های زاگرس عملکرد بهتری دارند. چن^۳ و همکاران (۲۰۱۷) الگوریتم TRMM-3B42 را برای طوفان‌های گرمسیری در مقیاس روزانه برای اقیانوس آرام مورد ارزیابی قرار دادند که در این تحقیق الگوریتم یاد شده مطابقت خوبی با داده‌های مشاهداتی داشت. معظمی و همکاران (۲۰۱۴) به منظور بررسی عدم قطعیت بارش ماهواره‌ای، داده‌های دو الگوریتم بارش ماهواره‌ای PERSIANN و TRMM-3B42 در منطقه جنوب غربی ایران را با داده‌های ایستگاه‌های زمینی مقایسه کردند، جهت اصلاح خطا از یک مفصل گاوسی چند متغیره و برای ارزیابی مدل از شاخص‌های آماری شامل بایاس (bias)، جذر میانگین مربعات خطاها^۴ (RMSE) و ضریب همبستگی^۵ (CC) استفاده کردند. عبدی و همکاران (۲۰۱۶) از ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری و توابع مفصل، سه تابع مفصل فرانک، کلایتون و گامبل در پیش‌بینی خشکسالی استان آذربایجان شرقی استفاده کردند. لیو^۶ و همکاران (۲۰۱۷) به منظور پیش‌بینی احتمالی سیل از تابع مفصل استفاده کردند، آنها به این نتیجه رسیدند که پیش‌بینی‌های احتمالی تولید شده توسط HUP^۷ مبتنی بر مفصل در مقایسه با HUP متاگوسی از قابلیت اطمینان کمی بالاتر و وضوح پایین‌تری برخوردار هستند. پنگ^۸ و همکاران (۲۰۱۷) از روش مفصل-مونت کارلو برای بهبود تجزیه و تحلیل خطر سیل در پایین دست یک مخزن استفاده کردند، در این مطالعه یک روش مفصل مونت کارلو (CMC^۹) برای بهبود خطر سیل برای کنترل سیلاب تلاقی در پایین دست یک مخزن پیشنهاد شده است. معظمی و گلیمان (۲۰۱۷) به منظور بررسی عدم قطعیت بارش ماهواره‌ای، داده‌های دو الگوریتم بارش ماهواره‌ای PERSIANN و TRMM-3B42 در

^۶ Liu

^۷ Hydrological uncertainty processor

^۸ Peng

^۹ Copula Monte Carlo

^۱ Bitew and Gebremichael

^۲ Berressa

^۳ Chen

^۴ Root-Mean-Square Error

^۵ Correlation coefficient



برای کاهش آریبی محصولات بارش ماهواره‌ای در زیر حوضه تیکز آتبارا در کشور اتیوپی که دارای توپوگرافی ناهموار بود یک مدل رگرسیون کوانتیل مبتنی بر D-vine Copula (DVQR) پیشنهاد دادند. مختاری و همکاران (۲۰۲۱) داده‌های ماهواره CHIRPS در حوضه آبریز سد کوثر با استفاده از توابع مفصل مورد ارزیابی قرار دادند.

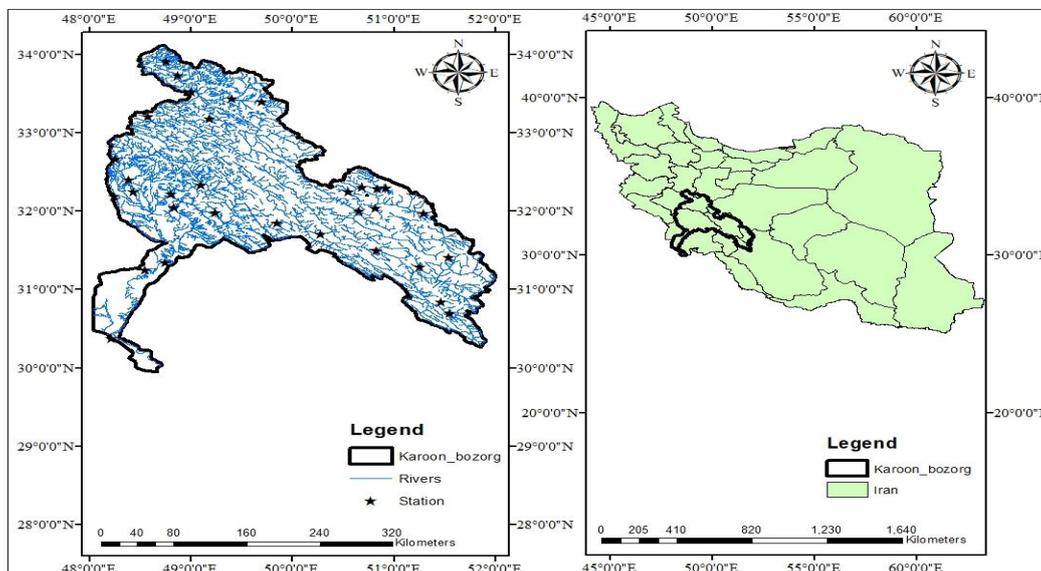
در مطالعات بررسی محصولات ماهواره‌ای علاوه بر ارزیابی داده‌های بارش ماهواره‌ای و برآورد خطای ماهواره‌های مختلف، اصلاح خطا و آریبی داده‌های ماهواره‌ای اهمیت بسیار زیادی دارد. یکی از راه‌های اصلاح آریبی بارش ماهواره‌ای استفاده از توابع مفصل است، بدین منظور در این مطالعه ضمن ارزیابی داده‌های بارش روزانه ماهواره GPM و برآورد خطای داده‌های ماهواره‌ای نسبت به داده‌های ایستگاه‌های زمینی، جهت اصلاح آریبی بارش ماهواره‌ای از توابع مفصل ارشمیدسی استفاده شد. آنچه که در این پژوهش در مقایسه با سایر تحقیقات اهمیت بیشتری دارد، استفاده از الگوریتم‌های فرا کاوشی جدید جهت محاسبه ضریب توابع مفصل به‌منظور تعدیل خطای بارش ماهواره‌ای و تولید داده‌های بارش بادقت بالا است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کارون بزرگ از حوضه‌های باز ایران است و زیرمجموعه حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان به حساب می‌آید که بین طول‌های ۴۸ تا ۵۱/۷۵ درجه و عرض‌های شمالی ۲۹/۹ تا ۳۲/۶۲ درجه قرار دارد.

منطقه جنوب غربی ایران را با داده‌های ایستگاه‌های زمینی مقایسه کردند، جهت اصلاح خطا از یک مفصل گاوسی چند متغیره و برای ارزیابی مدل از شاخص‌های آماری شامل بایاس (bias)، جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) و ضریب همبستگی (CC) استفاده کردند. شریفی و همکاران (۲۰۱۹) عدم قطعیت بارش ماهواره‌ای ماهواره GPM-IMERG با استفاده از توابع مفصل در محدوده شمال شرق کشور اتریش مورد مطالعه قرار دادند، در این تحقیق تابع مفصل t مورد استفاده قرار گرفت و نتایج قابل قبولی مشاهده شد. احمدی (۱۳۹۹) توابع مفصل مختلف را جهت مدل‌سازی دما و بارش سالانه استان خوزستان مورد بررسی قرار داد، به این نتیجه رسید که در ایستگاه‌های آبادان، دزفول، ماهشهر و مسجدسلیمان تابع مفصل کلاپتون و در سایر ایستگاه‌های استان تابع مفصل فرانک بهترین عملکرد را داشته است. لازم به توضیح است در این تحقیق ضرایب توابع مفصل با استفاده از الگوریتم نهنگ کوهاندار بهینه شد. بیاتی و همکاران (۱۴۰۰) کارایی توابع مفصل جهت برآورد تلفات بارش مدلسازی بارش رواب در حوضه آبخیز کسلیان مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از توابع مفصل می‌توان با دقت بیشتری مقدار شاخص نفوذ ϕ را تخمین زد. میرعباسی و همکاران (۲۰۱۲) از کاپولاهای دو بعدی برای تحلیل ویژگی‌های مدت زمان و شدت خشکسالی ایستگاه سنجش شریفخانه استفاده کردند. خالدی‌علداری و همکاران (۱۴۰۱) از توابع مفصل جهت پیش‌بینی بارش روزانه در شرق حوضه دریاچه ارومیه استفاده کردند. محمد عبدالله و همکاران (۲۰۲۳)



شکل (۱) موقعیت حوزه آبریز کارون بزرگ و ایستگاه های سینوپتیک مورد استفاده

(۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه های سینوپتیک مورد استفاده، نمایش داده شده است.

در جدول (۱) نام، ارتفاع از سطح دریا و موقعیت جغرافیایی ۲۷ ایستگاه های سینوپتیک مورد استفاده در محدوده مطالعاتی ذکر شده است. لازم به توضیح است با توجه به تعداد زیاد ایستگاه های سینوپتیک مورد استفاده و محدودیت ابعاد و به منظور جلوگیری از شلوغ شدن اشکال در رسم نمودارها به جای نام هر ایستگاه از اعداد یک تا ۲۷ که به ترتیب شماره هر ایستگاه سینوپتیک در جدول (۱) می باشد، استفاده شده است.

این حوزه دارای مساحت ۶۷،۲۵۷ کیلومترمربع و متوسط بارش سالانه ۶۰۰ میلیمتر است که رود اصلی آن کارون با طول ۸۹۰ کیلومتر و میانگین آبدهی سالانه ۱۸۷۰۰ میلیون مترمکعب است. رودخانه کارون از بلندترین قله زاگرس یعنی زرد کوه بختیاری با ارتفاع ۴۴۰۰ متر سرچشمه گرفته و در انتها به خلیج فارس منتهی می شود. حوزه کارون بزرگ با دارا بودن سدهای بزرگ احداث شده و در حال ساخت و پتانسیل تولید نیرو ۲۰ هزار مگاوات، از لحاظ منابع آب و تولید انرژی برقی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (خدابخش نژاد و همکاران، ۱۳۹۴). در شکل



جدول (۱) شماره، نام، مختصات جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا ایستگاه های سینوپتیک مورد استفاده

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	X	Y	ارتفاع (متر)
۱	آبادان	۴۸/۲۱	۳۰/۳۸	۷
۲	یاسوج	۵۱/۵۶	۳۰/۷۰	۱,۸۱۶
۳	سی سخت	۵۱/۴۷	۳۰/۸۴	۲,۱۳۳
۴	اهواز (کشاورزی)	۴۸/۵۵	۳۱/۴۵	۱۲
۵	اهواز	۴۸/۷۴	۳۱/۳۴	۲۳
۶	سمیرم	۵۱/۵۵	۳۱/۴۲	۲,۴۶۰
۷	لردگان	۵۰/۸۳	۳۱/۵۰	۱,۶۱۱
۸	دهدز	۵۰/۲۸	۳۱/۷۱	۱,۴۵۷
۹	ایذه	۴۹/۸۵	۳۱/۸۵	۷۶۷
۱۰	بروجن	۵۱/۳۰	۳۱/۹۸	۲,۲۶۰
۱۱	مسجدسلیمان	۴۹/۲۴	۳۱/۹۸	۳۲۱
۱۲	اردل	۵۰/۶۶	۳۲/۰۱	۱,۸۷۳
۱۳	شوشتر	۴۸/۸۳	۳۲/۰۵	۶۷
۱۴	شوش	۴۸/۲۴	۳۲/۱۹	۶۵
۱۵	گتوند	۴۸/۸۱	۳۲/۲۲	۷۰
۱۶	صفی آباد (دزفول)	۴۸/۴۳	۳۲/۲۵	۸۳
۱۷	فارسان	۵۰/۵۶	۳۲/۲۶	۲,۰۶۲
۱۸	شهرکرد	۵۰/۸۴	۳۲/۲۹	۲,۰۴۹
۱۹	لالی	۴۹/۱۰	۳۲/۳۴	۳۶۵
۲۰	حسینیه	۴۸/۲۵	۳۲/۶۷	۳۵۴
۲۱	شول آباد	۴۹/۱۸	۳۳/۱۹	۱,۵۹۱
۲۲	سپیددشت	۴۸/۵۸	۳۳/۲۱	۱,۰۲۱
۲۳	الیگودرز	۴۹/۷۰	۳۳/۴۱	۲,۰۲۲
۲۴	ازنا	۴۹/۴۱	۳۳/۴۵	۱,۸۷۲
۲۵	درود	۴۹/۰۰	۳۳/۵۲	۱,۵۲۲
۲۶	سیلاخور	۴۸/۸۷	۳۳/۷۴	۱,۴۹۷
۲۷	بروجرد	۴۸/۷۶	۳۳/۹۲	۱,۶۲۹

محصولات بارش ماهواره‌ای GPM¹

GPM (سنجش بارش جهانی) نام پروژه‌ای مشترک بین ناسا و آژانس کاوش‌های هوافضای ژاپن و دیگر آژانس‌های فضایی بین‌المللی است که رسالت آن دیدبانی پیوسته میزان بارش زمین است. این پروژه بخشی از برنامه ناسا به نام مأموریت‌های روش‌مند زمین است که با استفاده از مجموعه‌ای از ماهواره‌ها به منظور تأمین پوشش کلی کره زمین فعالیت می‌کند. این پروژه نقشه‌های بارش با پوشش

سراسری و وضوح تصویر ۱/۱*۰/۱ درجه و مراحل زمانی نیم ساعته از سال ۲۰۱۴ تاکنون را تهیه می‌کند که به محققان و پژوهشگران در زمینه مطالعه اقلیم جهان، پیش‌بینی حوادث و بلایای طبیعی و افزایش و بهبود کاربرد داده‌های ماهواره‌ای در زمینه کمک به جامعه بشری یاری می‌رساند (آرتور و همکاران، ۲۰۱۴).

در این تحقیق تصاویر بارش ماهواره‌ای ۱۰۰ روز بارشی مشخص ماهواره GPM که از این پس بارش ماهواره‌ای

¹ Global Precipitation Measurement

هر شکلی از توابع احتمال تجمعی حاشیه ای می باشند. زیرا برای تولید یک مدل چند متغیره، توزیع‌های حاشیه‌ای می توانند به طور مستقل از هم انتخاب شده و نیازی نیست مانند توابع توزیع دو متغیره، تابع حاشیه ای از توزیع خاصی پیروی کند. مهمتر آنکه توابع مفصل قادر به تشریح تغییرات درجه همبستگی متغیرها در بخش‌های مختلف توزیع احتمال توأم می‌باشد، این خصوصیت در سایر روش‌های شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی مشاهده نمی شود. مفصل اتصال دهنده توابع توزیع حاشیه ای P متغیر تصادفی $F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_p(x_p)$ و تابع توزیع توأم آنها $F(x_1, x_2, \dots, x_p)$ بوده، به طوری که با داشتن یک تابع توزیع توأم، مجموعه توابع حاشیه ای محتمل تشکیل دهنده آن قابل ارزیابی است و برعکس. (روابط ۱ و ۲)

(۱)

$$C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_p(x_p)) = F(x_1, x_2, \dots, x_p)$$

در نتیجه

$$F_1(x_1) = U_1, F_2(x_2) = U_2, F_p(x_p) = U_p$$

(۲)

$$C(u_1, u_2, \dots, u_p) = \Pr(U_1 \leq u_1, U_2 \leq u_2, \dots, U_p \leq u_p)$$

توجه به این نکته ضروری است که مقدار هر کدام از این متغیرها در محدوده $[0, 1]$ قرار می‌گیرند. به بیان دیگر، هر جفت (U_1, U_2) منجر به یک نقطه $G(y)$ و $F(x)$ در مربعی به ابعاد واحد $[0, 1] * [0, 1]$ می‌شود و این جفت داده، به نوبه خود دارای مقداری در محدوده بازه $[0, 1]$ عنوان توزیع توأم $H(x, y)$ می‌باشند.

توابع مفصل ارشمیدسی، به دلیل ساختار ساده و متقارن یکی از پرکاربردترین و مهم‌ترین توابع مفصل است. معادلات آن به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$C(u, v) = \theta^{-1}(\theta(u) + \theta(v)) \quad (3)$$

پارامتر θ (به عنوان مولد مفصل شناخته می‌شود که پیوسته و غیرمنفی محدب است. رابطه کلی بین تاو کندال و این مولد برای مجموعه داده‌های دومتغیره به صورت رابطه زیر است (اسکلار، ۱۹۵۹).

نامیده می‌شود، طی سالهای ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ تهیه و بارش ماهواره‌ای سلول‌های در موقعیت ۲۷ ایستگاه سینوپتیک در محدوده مطالعاتی مورد نظر استخراج شد و مورد بررسی قرار گرفت.

داده های مورد استفاده

در این مطالعه محصولات بارش ماهواره‌ای، ماهواره GPM در محدوده مطالعاتی حوضه آبریز کارون بزرگ، مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور داده‌های ۱۰۰ روز بارشی مشخص در ایستگاه های سینوپتیک (به شرح جدول ۱) واقع در حوزه آبریز کارون بزرگ جمع آوری شد و پس از دانلود تصاویر بارش ماهواره GPM برای ۱۰۰ روز مذکور، میزان بارش در سلول شامل هر ایستگاه سینوپتیک استخراج شد. داده های مورد استفاده در این پژوهش شامل یک ماتریس $100 * 27$ داده های مشاهداتی حاصل از ایستگاه های سینوپتیک و یک ماتریس $100 * 27$ شامل داده های متناظر داده های مشاهداتی که از ماهواره GPM استخراج شده است. برای اصلاح خطا داده‌های ماهواره GPM در مقیاس زمانی روزانه، ۹۰ درصد داده ها (داده های ۹۰ روز بارشی) به عنوان داده های آموزش و ۱۰ درصد باقیمانده (داده های ۱۰ روز بارشی) به عنوان داده های تست انتخاب شد.

توابع مفصل

به طور کلی مفصل^۱ یا کاپولا یک تکنیک ریاضی انعطاف پذیر است که مجموعه ای از توابع احتمال تجمعی حاشیه ای تک متغیره را به یکدیگر متصل و یک تابع احتمال تجمعی چند متغیره را تولید می‌کند. در واقع مفصل مبتنی بر ارتباط و وابستگی غیرخطی بین متغیرها بوده و پیوند دهنده توزیع توأم و توابع حاشیه ای است. از یک نقطه نظر، توابع مفصل توابعی هستند که توابع توزیعی چند متغیره را به توابع توزیعی حاشیه ای یک بعدی آنها اتصال می دهند و از سوی دیگر دارای حاشیه های یک بعدی یکنواخت در محدوده $[0, 1]$ می باشند. توابع مفصل اصولاً قادر به ترکیب

^۱ Copula



جدول (۲) تابع توزیع تجمعی توابع فرانک، کلایتون و علی-میخائیل-حق که از پرکاربردترین و مهمترین توابع مفصل ارشمیدسی هستند را نشان می دهد.

$$\tau = 1 + \epsilon \int_0^1 \frac{\theta(t)}{\theta'(t)} dt \quad (4)$$

$$t = u, v$$

جدول (۲): برخی از توابع مفصل ارشمیدسی تک پارامتری رایج

خانواده مفصل Copula family	تابع مفصل Copula	تابع توزیع تجمعی CDF	θ
	علی - میخائیل - حق Ali - Mikhail - Haq	$C(u, v) = \frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}$	$-1 \leq \theta \leq 1$
ارشمیدسی Archimedean	کلایتون Clayton	$C(u, v) = \max \left[(u^{-\theta} + v^{-\theta})^{-1/\theta}, 0 \right]$	$\theta \geq 0$
	فرانک Frank	$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\theta \neq 0$

فاز ۲- دفاع اسب آبی در برابر شکارچیان (اکتشاف).
فاز ۳- فرار کردن اسب آبی از شکارچی است (بهره برداری).
جهت مطالعه بیشتر به مقاله مرجع مراجعه شود.

الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (PSO^v)

الگوریتم ازدحام ذرات PSO از رفتار جمعی پرندگان در یافتن غذا بهره می گیرد. این فرایند را می توان به این شکل تعریف کرد که گروهی از پرندگان به صورت تصادفی در منطقه ای به دنبال غذا می گردند و تنها در یک قسمت از آن منطقه غذا وجود دارد. در PSO هر جواب مسئله، موقعیت هر پرنده در فضای جستجو است که ذره نامیده می شود. تمام ذره ها دارای یک مقدار شایستگی هستند که از تابع شایستگی که باید بهینه شود به دست می آیند و پرنده ای به غذا نزدیک تر است که شایستگی بیشتری دارد و همچنین هر ذره یک سرعت دارد که مسیر حرکت آن را به سوی ذره بهینه فعلی هدایت می کند. در واقع انبوه ذرات که کمینه یک تابع را جستجو می کنند، همانند دسته ای از پرندگان عمل خواهند کرد که به دنبال غذا می گردند (کندی و ایبرهات، ۱۹۹۵).

جهت مطالعه بیشتر به مقاله ابوالیقہ^۸ (۲۰۲۵) مراجعه شود.

محاسبه پارامتر وابستگی تابع مفصل با استفاده از الگوریتم های بهینه ساز

برای محاسبه پارامتر وابستگی تابع مفصل روش های متعددی مانند گشتاور^۱، حداکثر درست نمایی کانونیکال^۲ (CML)، حداکثر درست نمایی^۳ (MLM)، روش تابع منطقی برای حاشیه ها^۴ (IFM) و روش های الگوریتم های بهینه یابی (فرا کاوشی)^۵ که هر کدام معایب و مزایای متعددی دارد، می توان استفاده نمود. در این تحقیق پارامترهای تابع مفصل با بهره گیری از الگوریتم های فرا کاوشی TSA، PSO و HO در محیط متلب بهینه یابی شد.

الگوریتم بهینه سازی HO^۶

HO یک الگوریتم بهینه سازی ناپارامتریک جدید که از شبیه سازی رفتاری اسب های آبی شامل ترکیب موقعیت مکانی آنها در آب، استراتژی های دفاعی در برابر تهدیدات و تکنیک های فرار از شکارچیان الهام گرفته است که به صورت مفهومی از طریق یک مدل دارای سه فاز به شرح ذیل که هر کدام به صورت ریاضی تعریف شده اند، ترسیم شده است (امیری و همکاران، ۲۰۲۴).

فاز ۱- به روز رسانی موقعیت اسب آبی در رودخانه یا برکه (اکتشاف) است.

⁵ Meta-Heuristic Algorithms

⁶ Hippopotamus_optimization_algorithm

⁷ Particle swarm optimization

⁸ Abualigah

¹ Method-of-Moments

² Canonical Maximum Likelihood

³ Maximum Likelihood Method

⁴ Inference Functions for Margins

الگوریتم بهینه سازی TSA^۱

الگوریتم TSA (الگوریتم ازدحام تونیکیت) با الهام از زیست‌شناسی و با تقلید از رفتار ازدحامی و دفع فواره‌های تونیکت‌ها در حین حرکت و فرایند جستجو برای غذا در طبیعت پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که TSA در مقایسه با الگوریتم‌های رقابتی دیگر راه‌حل‌های بهینه‌تری تولید می‌کند (کائور و همکاران، ۲۰۲۰).

جهت مطالعه بیشتر به مقاله ژنگ و همکاران (۲۰۲۵) مراجعه شود.

شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش جهت ارزیابی دقت ماهواره GPM در تخمین میزان بارش روزانه از شاخص‌های ارزیابی Bias، RMSE، RBias^۲ و CC با روابط (۵) تا (۸) استفاده شد (معظمی و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین جهت ارزیابی دقت ماهواره GPM در پیش‌بینی وقوع یا عدم وقوع بارش از شاخص‌های ارزیابی POD^۳، CSI^۴ و FAR^۵ با روابط (۹) تا (۱۱) استفاده شد (غفاریان و همکاران، ۱۳۹۲).

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{si} - P_{oi})}{N} \quad (5)$$

$$RBias = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{si} - P_{oi})}{\sum_{i=1}^N P_{oi}} * 100 \quad (6)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_{si} - P_{oi})^2}{N} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{si} - \bar{P}_s)(P_{oi} - \bar{P}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{si} - \bar{P}_s)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{oi} - \bar{P}_o)^2}} \quad (8)$$

$$POD = \frac{a}{(a+c)} \quad (9)$$

$$FAR = \frac{b}{(a+b)} \quad (10)$$

$$CSI = \frac{a}{(a+b+c)} \quad (11)$$

که در این فرمول‌ها Psi برابر مقادیر محاسباتی، Poi برابر مقادیر مشاهداتی، \bar{P}_s برابر میانگین مقادیر محاسباتی و \bar{P}_o برابر میانگین مقادیر مشاهداتی و N تعداد سری زمانی است. مقادیر a، b و c به صورت زیر تعریف می‌شوند.

a بیانگر حالتی است که هر دو ابزار اندازه‌گیری باران یعنی ایستگاه سینوپتیک و تخمین ماهواره باران‌سنجی برای بارش مقدار ثبت کرده‌اند. در این تحقیق مقدار وقوع یا عدم وقوع بارندگی به میزان ۰/۱ میلیمتر در نظر گرفته شد (غفاریان و همکاران، ۱۳۹۲).

b بیانگر تعداد حالتی است که ماهواره بارش را تخمین زده است؛ ولی در واقعیت باران اتفاق نیفتاده است.

c بیانگر تعداد وقایعی است که در واقعیت بارش اتفاق افتاده، ولی ماهواره باران را تخمین زده است.

شاخص‌های Bias، RBias، RMSE و FAR هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد و شاخص‌های CC، POD و CSI هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، داده‌های ماهواره دقت بالاتری دارد (غفاریان و همکاران، ۱۳۹۲).

نتایج و بحث

ارزیابی محصولات بارش ماهواره GPM

همانطوریکه قبلاً ذکر شد، جهت ارزیابی داده‌های بارش ماهواره GPM و مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک از شاخص‌های آماری Bias، RMSE و CC استفاده شد. در شکل (۲) قسمت‌های a، b و c به ترتیب مقدار Bias، RMSE و CC برای سری داده‌های هر کدام از ایستگاه‌های سینوپتیک (داده‌های مشاهداتی) و داده‌های بارش ماهواره GPM (داده محاسباتی) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است مقدار Bias برای ۲۷ ایستگاه سینوپتیک بین ۳/۹ (ایستگاه آبادان) تا ۱۴/۶ (ایستگاه سپیددشت) و مقادیر آماره RMSE بین ۶/۶ (ایستگاه آبادان) و ۲۲/۲ (ایستگاه سپیددشت) و مقدار آماره CC بین ۰/۲ (ایستگاه سپیددشت) تا ۰/۸۳ (ایستگاه سمیرم) متغیر است.

در شکل (۲) قسمت‌های d، e و f روند تغییرات آماره‌های Bias، RMSE و CC با افزایش ارتفاع از سطح دریا ایستگاه‌های سینوپتیک را نشان می‌دهند. همان‌طوریکه

⁴ Critical Success Index

⁵ False Alarm Ratio

¹ Tunicate Swarm Algorithm

² Relative Bias

³ Probability Of Detection



اریبی داده‌ها، امری ضروری است. از آنجایی که توابع مفصل قادرند وابستگی‌ها را توسط توزیع چندمتغیره توأم بین متغیرها مدل کنند، بنابراین ساختار وابستگی مکانی مقادیر خطا در بین پیکسل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴) ماتریس نقشه حرارتی^۱ ۲۷*۲۷ ساختار وابستگی مکانی بین خطاهای ۲۷ سلول (ایستگاه سینوپتیک) را نشان می‌دهد که در آن ضریب همبستگی بین صفر تا یک متغیر است. ضریب همبستگی مکانی صفر بین دو سلول به این مفهوم است که بین خطاهای دو سلول وابستگی وجود ندارد، اگر خطای دو سلول دارای ضریب همبستگی مکانی نزدیک به یک باشد به مفهوم وابستگی مکانی زیاد بین آن دو سلول است.

برای اصلاح خطا داده‌های ماهواره GPM در مقیاس زمانی روزانه، توابع توزیع احتمال بهینه بر روی مقادیر خطای داده‌های بارش ماهواره‌ای و زمینی (داده‌های آموزش) برازش شد و پس از انتخاب توزیع مناسب، با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی مورد استفاده پارامتر وابستگی توابع مفصل فرانک و کلایتون محاسبه شد. جدول (۳) نام ایستگاه، بهترین توزیع آماری برازش شده، پارامتر وابستگی محاسبه شده برای توابع مفصل فرانک و کلایتون با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی PSO، HO و TSA نشان داده شده است. لازم به توضیح است عملیات بهینه یابی در نرم افزار متلب برنامه نویسی شد.

شکل (۵) روند همگرا شدن مقدار آماره RMSE به کمترین مقدار برای ۲۷ ایستگاه مورد مطالعه جهت محاسبه پارامتر وابستگی توابع مفصل ارشمیدسی فرانک و کلایتون با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی PSO، HO و TSA را نشان می‌دهد، در ادامه شکل (۶) مقدار کمترین RMSE حاصل از فرآیند بهینه یابی برای هر کدام از ایستگاه‌های سینوپتیک با استفاده از الگوریتم‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

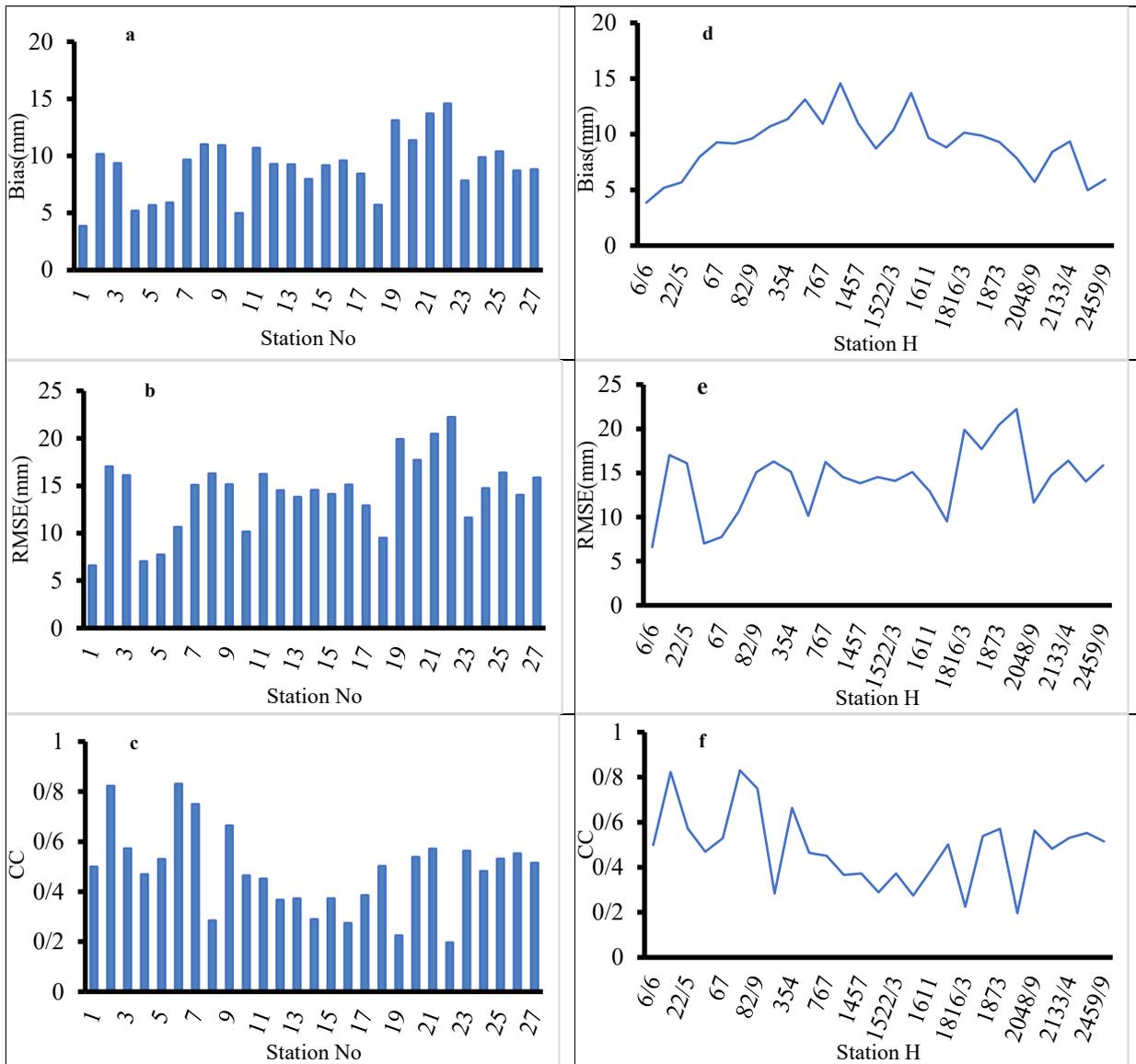
که در شکل قابل مشاهده است مقدار Bias تا ارتفاع ۱۵۰۰ متر، روند افزایشی و در ارتفاعات بالای ۱۵۰۰ متر با افزایش ارتفاع مقدار بایاس روند کاهشی داشته است. مقدار RMSE با افزایش ارتفاع روند افزایشی و مقدار آماره CC با افزایش ارتفاع روند کاهشی داشته است،

آماره‌های POD، CSI و FAR جهت صحت‌سنجی قابلیت تشخیص وقوع یا عدم وقوع پدیده بارش توسط ماهواره‌های سنجنده بارش به کار برده می‌شود. در شکل (۳) قسمت های a، b و c مقدار آماره های POD، CSI و FAR برای سری داده‌های هر کدام از ایستگاه‌های سینوپتیک و داده‌های بارش ماهواره GPM را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است مقدار POD برای ۲۷ ایستگاه سینوپتیک بین ۰/۷۶ (ایستگاه شول آباد) تا ۰/۹۹ (ایستگاه لردگان) و مقادیر آماره CSI بین صفر (ایستگاه شهرکرد) تا ۰/۵ (ایستگاه آبادان) و مقدار آماره FAR بین ۰/۶۲ (ایستگاه شول آباد) تا ۰/۹۸ (ایستگاه لردگان) متغیر است. لازم بذکر است هرچه مقدار آماره POD و CSI به عدد یک و آماره FAR به صفر نزدیکتر باشد ماهواره دقت بیشتری در پیش بینی وقوع یا عدم وقوع باران دارد. در شکل (۳) قسمت d روند تغییرات آماره‌های POD، CSI و FAR با افزایش ارتفاع ایستگاه‌های سینوپتیک را نشان می‌دهد، به وضوح مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع آماره‌های POD و CSI روند افزایشی و آماره FAR روند کاهشی دارد. به بیان دیگر ماهواره GPM در ارتفاعات بالاتر دقت بیشتری در تخمین وقوع یا عدم وقوع باران دارد.

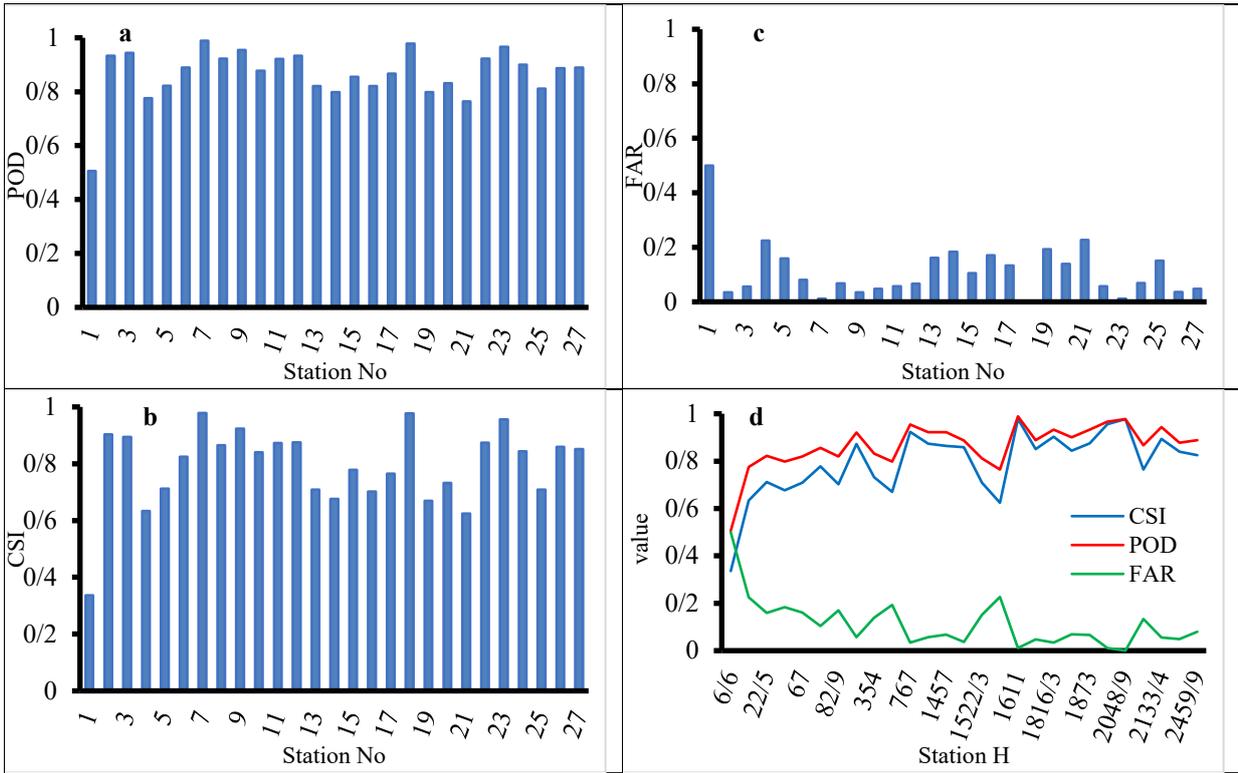
اصلاح اریبی بارش ماهواره GPM

باتوجه به ماهیت داده‌های سنجنش‌زدور که ارتباط مستقیمی با پدیده‌های موردنظر ندارد، نسبت به داده‌های زمینی دارای خطا و اریبی است که برای ماهواره‌های مختلف متفاوت است. جهت استفاده از داده‌های سنجنش‌زدور در مدل‌های هیدرولوژیکی، ارزیابی و اصلاح

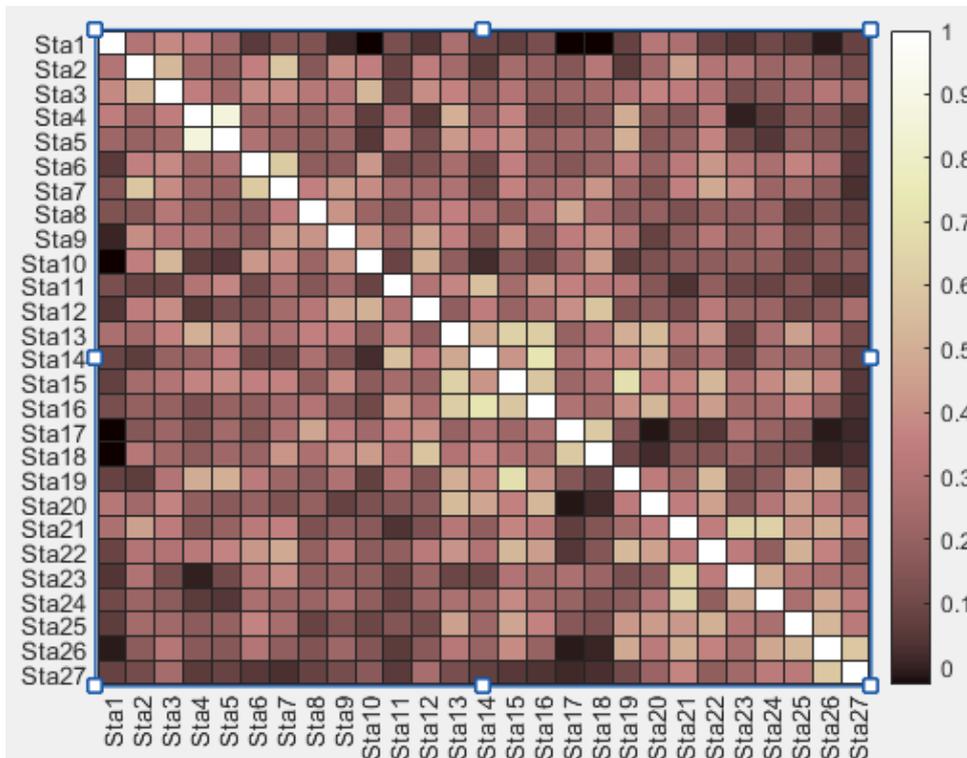
^۱ Heatmap



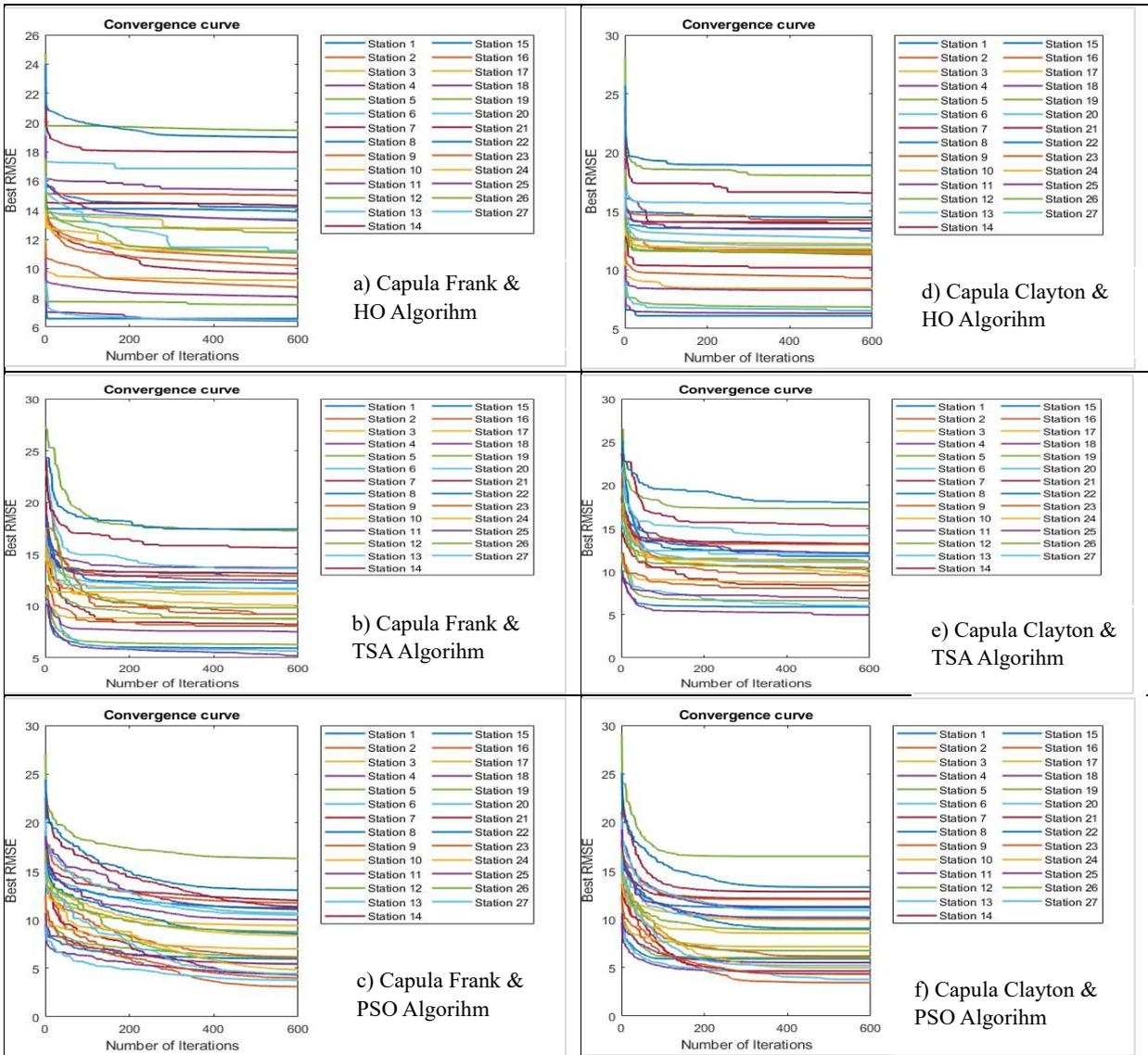
شکل (۲) a: مقدار آماره Bias و b: مقدار آماره RMSE و c: مقدار آماره CC در ۲۷ ایستگاه سینوپتیک و d، e و f روند تغییرات آماره های Bias، RMSE و CC با افزایش ارتفاع



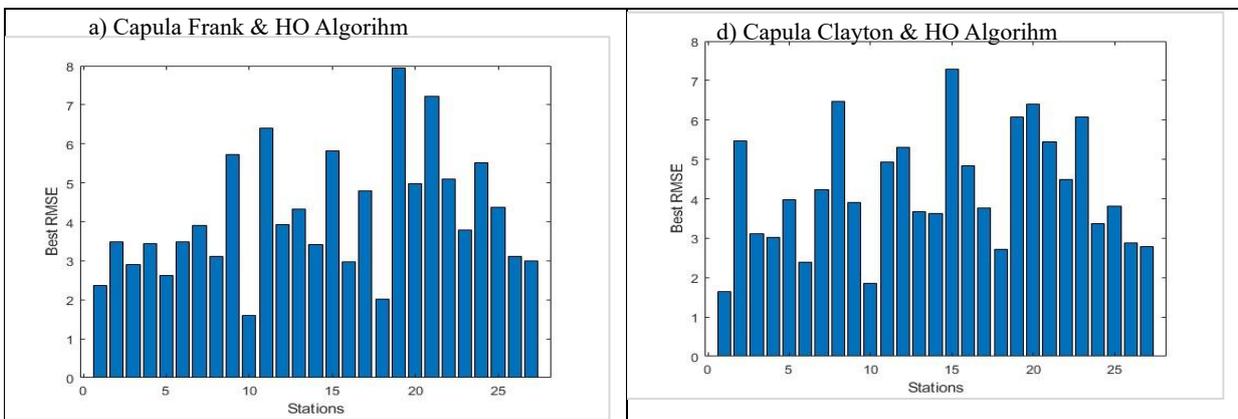
شکل (۳) قسمت های a, b, c مقدار آماره های POD, CSI, FAR و قسمت d روند تغییرات آماره های POD, CSI, FAR با افزایش ارتفاع

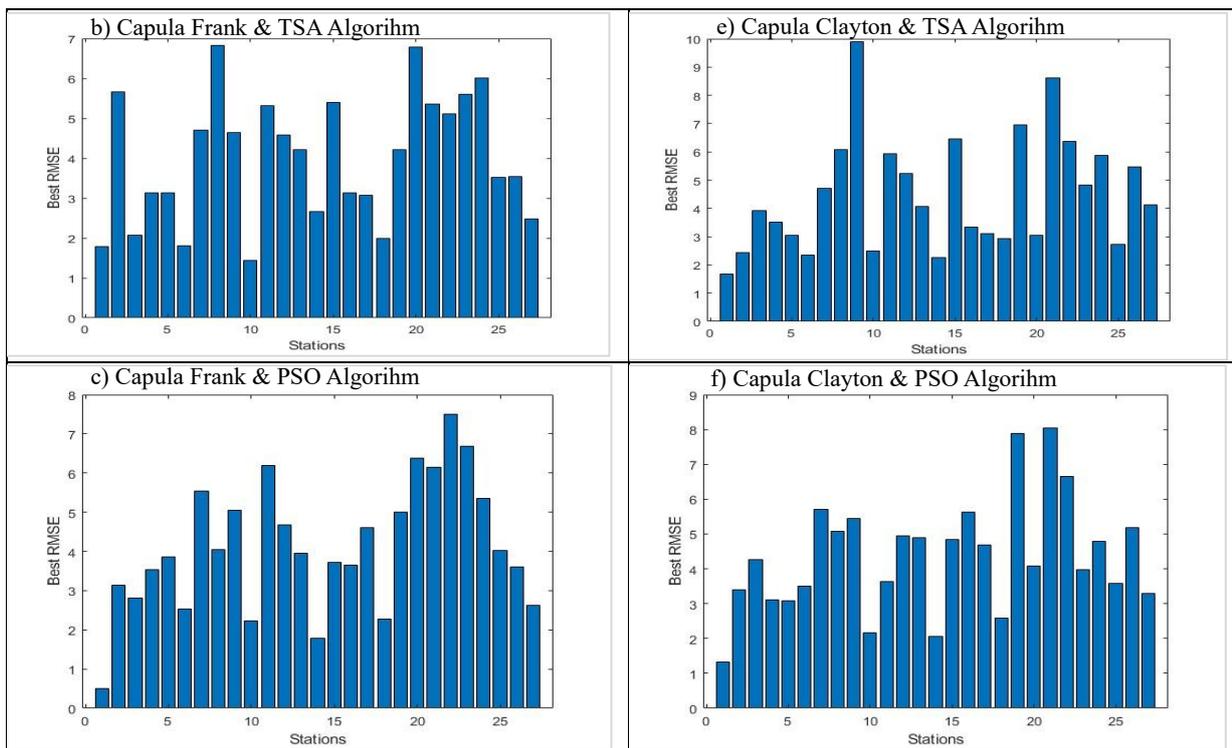


شکل (۴) ماتریس نقشه حرارتی همبستگی مقادیر خطا بین ۲۷ سلول (ایستگاه) برای محصول GPM بر اساس ۱۰۰ واقعه بارش مشاهداتی



شکل (۵) روند بهینه یابی پارامتر وابستگی توابع مفصل





شکل (۶) مقدار کمترین مقدار RMSE حاصل از فرآیند بهینه یابی برای هر کدام از ایستگاه‌های سینوپتیک با استفاده از الگوریتم‌های مورد استفاده

جدول (۳) توزیع برازش شده و پارامتر وابستگی بهینه ایستگاه های سینوپتیک مورد استفاده

Frank Copula			Clayton Copula			توزیع برازش شده	ایستگاه - سلول	ردیف
HO	PSO	TSA	HO	PSO	TSA			
۰/۰۰	۰/۵۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۱۱	۰/۰۱	Gamma	آبادان	۱
۴/۴۱	۳/۰۴	۳/۱۹	۱۳/۱۴	۱/۴۱	۱/۲۲	Nakagami	یاسوج	۲
۸/۷۹	۱/۸۷	۳/۵۰	۴/۹۴	۱/۱۳	۱/۰۱	Gamma	سی سخت	۳
۰/۳۵	۰/۱۱	۰/۳۴	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۶	Gamma	اهواز (کشاورزی)	۴
۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۱۵	۱/۰۵	۰/۰۰	Gamma	اهواز	۵
۱/۵۱	۳/۳۲	۵/۵۹	۳/۹۶	۴/۵۳	۲/۷۵	Nakagami	سمیرم	۶
۱/۵۱	۲/۱۴	۱/۹۴	۵/۷۶	۰/۹۹	۰/۴۲	Weibull	لردگان	۷
۰/۰۰	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۰۱	۰/۳۵	۰/۷۱	Gamma	دهدز	۸
۰/۰۰	۰/۱۷	۱/۰۳	۰/۰۲	۰/۴۲	۰/۲۵	Weibull	ایذه	۹
۴/۰۰	۱/۲۶	۰/۲۱	۱/۱۸	۰/۶۷	۱/۲۹	GP ¹	بروجن	۱۰
۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۳۲	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۰۷	GP	مسجد سلیمان	۱۱
۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۰۱	۰/۲۴	۰/۶۶	Nakagami	اردل	۱۲
۱/۹۸	۰/۲۰	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۱۸	۰/۰۸	Weibull	شوشتر	۱۳
۰/۴۴	۰/۴۰	۰/۲۴	۶/۳۸	۰/۸۷	۰/۱۸	GP	شوش	۱۴
۰/۰۰	۰/۳۹	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۴۰	۰/۰۶	Log-Logistic	گتوند	۱۵
۰/۰۱	۰/۵۵	۰/۴۱	۲۰/۰۰	۰/۴۵	۰/۰۵	Weibull	صفی آباد (دزفول)	۱۶
۱/۱۳	۰/۰۷	۰/۴۴	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۰۳	Gamma	فارسان	۱۷
۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۹۹	۱۰/۴۵	۰/۰۲	۰/۰۷	Weibull	شهرکرد	۱۸
۳/۰۹	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۴	Weibull	لالی	۱۹
۸/۴۰	۰/۳۴	۱/۱۲	۲۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۱۴	Weibull	حسینیه	۲۰
۵/۱۲	۱/۷۸	۰/۱۲	۸/۳۰	۱/۸۱	۰/۲۱	Weibull	شول آباد	۲۱
۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۳۶	۳/۲۹	۰/۱۹	۰/۱۹	GP	سپیددشت	۲۲
۰/۹۱	۰/۶۰	۱/۹۴	۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۲۷	Gamma	الیگودرز	۲۳
۰/۲۱	۰/۰۲	۰/۵۸	۰/۰۰	۰/۰۴	۱/۲۰	GP	ازنا	۲۴
۲/۸۶	۱/۸۵	۱/۴۴	۱۹/۸۷	۰/۱۰	۰/۱۷	Weibull	درود	۲۵
۰/۷۷	۰/۴۰	۱/۲۲	۵/۰۱	۰/۵۳	۰/۱۴	Weibull	سیلاخور	۲۶
۱/۳۳	۰/۹۴	۳/۲۵	۰/۵۸	۰/۰۱	۰/۷۱	Nakagami	بروجرد	۲۷

مشاهداتی حاصل از ایستگاه های سینوپتیک به عنوان داده مبدأ مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۴) مقدار آماره های Bias، RMSE و CC برای داده های اولیه بارش ماهواره GPM و داده های اصلاح شده با استفاده از توابع مفصل برای هر دو مرحله آموزش و تست ذکر شده است، می توان چنین

جهت ارزیابی دقت داده های شبیه سازی شده با استفاده از توابع مفصل، از آماره های Bias، RMSE و CC استفاده شد، شاخص های ذکر شده برای داده های اولیه حاصل از ماهواره GPM و داده های تصحیح شده توسط مدل توابع مفصل فرانک و کلاپتون به صورت جداگانه با داده های

¹ Generalized Pareto



PSO با ۱۳/۱ درصد بهبود مقدار Bias، ۱۴/۳ درصد بهبود مقدار RMSE و ۲۲/۲ درصد بهبود مقدار CC نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها داشته است.

نتیجه گرفت که برای داده‌های آموزش، توابع مفصل فرانک و کلایتون بهینه شده با الگوریتم فرا کاوشی PSO نتایج بهتری نسبت به الگوریتم HO و TSA دارد و برای داده‌های مرحله تست تابع مفصل بهینه شده با الگوریتم فرا کاوشی

جدول (۴) مقایسه درصد بهبود میزان اریبی داده های واقعی و داده های اصلاح شده (شبیه سازی) نسبت به داده های مشاهداتی

درصد بهبود شاخص			الگوریتم	مفصل	دوره
CC	RMSE	Bias			
۲۳/۶	۱۶/۴	۱۴	HO	Frank	آموزش
۷۱/۲	۴۴/۵	۶۲	PSO		
۴۸/۱	۲۶/۱	۲۷/۴	TSA		
۳۲/۴	۱۸	۱۷	HO	Clayton	
۶۹	۴۲/۵	۶۱/۸	PSO		
۴۶/۳	۲۵/۴	۲۶/۹	TSA		
۱۳/۶	۱۷/۴	۱۳/۷	HO	Frank	صحت سنجی
۲۲/۷	۷/۹	۵/۴	PSO		
۲۲/۶	۱۳/۹	۹/۴	TSA		
۱۷/۲	۱۰/۹	۸/۶	HO	Clayton	
۲۲/۲	۱۴/۳	۱۳/۱	PSO		
۲۴/۵	۶/۱	۷/۶	TSA		

بیشتری در تخمین وقوع یا عدم وقوع باران دارد. محصولات بارش ماهواره GPM با توجه به اندازه گیری غیرمستقیم پدیده بارش، دارای خطا و اریبی نسبت به ایستگاه های اندازه گیری باران می باشد، جهت اصلاح اریبی بارش ماهواره GPM از توابع مفصل کلایتون و فرانک استفاده شد و پارامتر وابستگی توابع مفصل با استفاده از الگوریتم های فراکاوشی PSO، HO و TSA محاسبه شد. پس از ارزیابی داده های اصلاح شده توسط توابع مفصل، مشخص شد تابع مفصل کلایتون با پارامتر وابستگی بهینه شده با استفاده از الگوریتم فراکاوشی PSO نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم ها داشته است. با توجه به درصد بهبود آماره های مورد استفاده ارائه شده در جدول (۴)، نتایج این پژوهش با نتایج تحقیقات معظمی و همکاران (۲۰۱۷) و مختاری و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد.

نتیجه گیری

از آنجایی که بارندگی را می توان مهم ترین عاملی دانست که به طور مستقیم در چرخه هیدرولوژی دخالت دارد، اندازه گیری میزان بارندگی دارای اهمیت ویژه ای است. باتوجه به مشکلات عدیده باران سنج ها در اندازه گیری میزان باران، در این مطالعه جهت تخمین میزان بارش از محصولات بارش ماهواره GPM در دوره آماری سال های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ استفاده شد. پس از ارزیابی محصولات بارش ماهواره ای با استفاده از آماره Bias، RMSE و CC و بررسی تغییرات این آماره ها با تغییرات ارتفاع، مشاهده شد که دقت ماهواره GPM در تخمین میزان بارش برای ارتفاعات پایین تر بهتر است. ولی در خصوص برآورد وقوع یا عدم وقوع بارش از آماره های POD، CSI و FAR استفاده شد و مشخص شد ماهواره GPM در ارتفاعات بالاتر دقت

منابع

- احمدی، ف. ۱۳۹۹. کاربرد توابع مفصل در مدل‌سازی دما و بارش سالانه استان خوزستان. مجله پژوهش آب ایران جلد ۱۴/ شماره ۲/ پیاپی ۳۸/ پاییز ۱۳۹۹ (۱۴۵-۱۵۶)
- بیاتی، ف. میرعباسی نجف آبادی، ر. فتاحی نافچی، ر. رادفر، م. ۱۴۰۰. ارزیابی کارایی توابع مفصل در برآورد تلفات بارش و مدل‌سازی بارش-رواناب، مطالعه موردی: حوزه آبخیز کسلیان. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۳۱، شماره ۳، ۳۰۱۱، صفحات ۳۱۳-۳۵۲. DOI: 10.22092/ijwmse.2020.120498.1441
- خالدی علمداری، م. مجونی هریس، ا. فاخری فرد، ا. ۱۴۰۱. کاربرد و ارزیابی توانایی توابع مفصل در تخمین بارش روزانه در شرق حوضه دریاچه ارومیه. رشیه آب و توسعه پایدار، سال نهم، شماره ۴، صفحات ۳۷ تا ۴۲. doi:http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v9i4.2206.1156.
- خدابخش نژاد، آ. پورکرمانی، م. آرین، م. متکان، ع. ا. چرچی، ع. ۱۳۹۴. زمین‌ساخت فعال حوضه رودخانه کارون بزرگ. مجله علوم زمین، دوره بیست و چهارم، شماره ۹۵، صفحه ۱۳ تا ۲۸.
- غفاریان، پ. برکاتی، س. م. ۱۳۹۲. راستی آزمایشی مدل پیش بینی و پژوهش وضع هوا (WRF) در پیش بینی بارشهای سنگین در حوضه کارون (مطالعه موردی: بارش ۲۰ تا ۲۱ بهمن ۱۳۸۴). نشریه پژوهشهای اقلیم‌شناسی، سال چهارم، شماره پانزدهم و شانزدهم.
- Abdallah, M. Zhang, K. Chao, L. Omer, A. Hassaballah, Kh. Reda, K. W. Liu, L. Tola, T. L. Nour, O. M. ۲۰۲۳. A D-vine copula-based quantile regression towards merging satellite precipitation products over a rugged topography at the upper Tekeze Atbara Basin of the Nile Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-2023-1799>
- Abdi, A. Hassanzadeh, Y. Talatahari, S. Fakhri Fard, A. ۲۰۱۶. Parameter estimation of copula functions using an optimization-based method. Springer-Verlag Wien. DOI 10.1007/s00704-016-1757-2
- Abimbola, O.P., Wenninger, J., Venneker, R., Mittelstet, A.R., ۲۰۱۷. The assessment of water resources in ungauged catchments in Rwanda. *J. Hydrol.: Reg. Stud.* ۱۳, ۲۷۴-۲۸۹.
- Abualigah, L. 2025. Particle Swarm Optimization: Advances, Applications, and Experimental Insign. *Computers, Materials and Continua* Volume 82, Issue 2, 17 February 2025, Pages 1539-1592. <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.060765>
- AghaKouchak, A. ۲۰۱۰. Simulation of Remotely Sensed Rainfall Fields Using Copula. PhD Thesis, University of Stuttgart, Germany.
- Arthur Y. Hou, Ramesh K. Kakar, Steven Neeck, Ardeshir A. Azarbarzin, Christian D. Kummerow, Masahiro Kojima, Riko Oki, Kenji Nakamura, and Toshio Iguchi. 2014. THE GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT MISSION. AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY.
- Bitew, M. M., Gebremichael, M. ۲۰۱۱. Evaluation of satellite rainfall products through hydrologic simulation in a fully distributed hydrologic model. *Water Resources Research*, Volume 47, Issue 6, CiteID W06526, DOI:10.1029/2010WR009917
- Katiraie Boroujerdy, P. S., Nasrollahi, N., Hsu, K. lin, and Sorooshian, S. ۲۰۱۳. Evaluation of satellitebased precipitation estimation over Iran. *Journal of Arid Environments*.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. ۱۹۹۵. Particle swarm optimization (PSO). In Proc. IEEE International Conference on Neural Networks. Perth. Australia. ۱۹۴۲-۱۹۴۸.
- Li D, Christakos G, Xinxin D, Wu J. 2017. Adequacy of TRMM satellite rainfall data in driving the SWAT modeling of Tiaoxi catchment (Taihu lake basin, China), *Journal of Hydrology*, Volume 556, Pages 1139-1152, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.01/2017.006>
- M, H, Amiri. N, Mehrabi Hashjin. M, Montazeri. S, Mirjalili. N, Khodadadi. ۲۰۲۴. Hippopotamus optimization algorithm: a novel nature-inspired optimization algorithm. *Scientific Reports*.

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/160088-hippopotamus-optimization-algorithm-ho>. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54910-3>

Mirabbasi, R., A. Fakheri-Fard and Y. Dinpashoh. 2012. Bivariate drought frequency analysis using the Copula method. *Theoretical and Applied Climatology*, 108: 191–206. DOI 10.1007/s00704-011-0524-7

Moazami, S. Golian, S. ۲۰۱۷. ENSEMBLE-BASED MULTIVARIATE SENSITIVITY ANALYSIS OF SATELLITE RAINFALL ESTIMATES USING COPULA MODEL. *Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling*. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803011-0/00014-8>

Moazami, S., Golian, S., Kavianpour, M. R, Hong, Y. ۲۰۱۴. Comparison of PERSIANN and VV TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) products with rain gauge data over Iran, *International Journal of Remote Sensing*, ۳۴:۲۲, ۸۱۵۶-۸۱۷۱, DOI: ۱۰/۱۰۸۰/۱۴۳۱۶۱/۲۰۱۳.۸۳۳۳۶۰.

Mokhtari, Sh. Sharafati, A. Razi, T. 2021. Validation of CHIRPS satellite-based precipitation data against the in situ observations using the Copula method: a case study of Kosar Dam basin, Iran. *RESEARCH ARTICLE HYDROLOGY*. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00682-7>

Peng, Y. Chen, K. Yan, H. Yu, X. ۲۰۱۷. Improving Flood-Risk Analysis for Confluence Flooding Control Downstream Using Copula Monte Carlo Method. *J. Hydrol. Eng. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584/0001526*.

Satnam, Kaur. Lalit K, Awasthi. A L, Sangal. Gaurav, Dhiman. ۲۰۲۰. Tunicate Swarm Algorithm: A new bio-inspired based metaheuristic paradigm for global optimization. *Journal Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103541>

Sharifia, E. Saghafianb, B. Steinackera, R. ۲۰۱۹. Copula-based stochastic uncertainty analysis of satellite precipitation products. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.035>

Sklar A. 1959. *Fonctions de Répartition à n Dimensions et Leurs Marges*, vol. 8. Publications de l'Institut de Statistique de L'Université de Paris; 229–231.

Zheng, R. Abdelazim, G. H. Bouaouda, A. Zhong, R. HuG. 2025. A Comprehensive Review of the Tunicate Swarm Algorithm: Variations, Applications, and Results. *Archives of Computational Methods in Engineering*. Volume 32, pages 2917–2986.