

**EXTENDED ABSTRACT**

**Evaluation and Optimization of Rain Gauge Network Based on the Geostatistic Methods and Firefly Algorithm. (Case study: Eastern Basin of Urmia Lake)**

E. Valipour<sup>1\*</sup>, M. A. Ghorbani<sup>2</sup> and E. Asadi<sup>3</sup>

1\* - Corresponding Author, MSc, Department of Water Engineering, Tabriz University  
(*Elmira.valipoor@yahoo.com*).

2- Professor, Department of Water Engineering, Tabriz University.

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Tabriz University.

Received: 23 April 2017

Revised: 14 April 2018

Accepted: 18 April 2018

**Keywords:** Firefly Algorithm, Optimization, Geostatistics, Rain Gauge Network.  
**DOI:** 10.22055/jise.2018.20549.1477.

**Introduction**

Rainfall is the main motivator in the hydrologic cycle of the basin and it is an element of meteorological phenomena undergoing severe changes in time and place. The suitability of density and distribution of rain gauges in the rain gauge networks of each area is an effective step in the success of the water plans, regional projecting and effective use of the information (Karamouz et al., 2010). Many researchers have shown that the geostatistical prediction method provides better estimates of the regional rainfall than the traditional methods. Tanaka and Putthividhya (2013) used the geostatistical method to assess the quality of the rainfall estimation in the Basin of Chao Phraya. They tried to calculate the difference between the rainfall data and the results obtained from the above methods by plotting Thiessen Network and the co-ordinate lines by Inverse Distance Weighting and Ordinary Kriging methods. They also examined the correlation between the height, humidity and temperature with the recorded rainfall values. The findings showed that height had a significant correlation with Monsoon rainfall, while humidity and temperature correlated with the monthly rainfalls. Yang and He (2013), using the super innovative firefly algorithm concluded that this algorithm is more suitable than the optimal search strategy. Considering the problems of Urmia Lake located in the northwest of Iran, comprehensive studies with an inclusive approach to the problems in this basin are considered necessary. Indeed, it is necessary to concentrate more on the process used in the design of the rain gauge networks and begin to redesign the existing networks in order to refine and complete them.

**Methodology**

**Region of study**

The Basin of Urmia Lake is located in the northwest of Iran between the geographical longitudes of 44°12' to 47°55'E and the geographical latitudes of 35°40' to 38°5'N. Its height above sea level is 1275 meters. In this study, the rainfall data included a 42-year statistical period from 1350 to 1392 including 36 stations of the Eastern Basin of Urmia Lake. The reconstruction of the statistics also occurred in the formation of this statistical period. Indeed, the rate of statistics reconstruction at all stations was less than 20% of the length of the statistical period.

**Methods of estimation in geostatistics****Kriging method**

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (1)$$

**Inverse Distance Weighting (IDW)**

$$Z(x) = \frac{1}{n} \sum Z(x_i) \quad (2)$$

**Firefly Algorithm**

Firefly Algorithm (FA) was developed by Yang (2009) based on the behavior and flashing patterns of fireflies. Charm's relationship with the changes of the insects' distance:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r} \quad (3)$$

The distance of  $i^{\text{th}}$  insects from  $j^{\text{th}}$  insect:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

Moving of  $i^{\text{th}}$  insect toward  $j^{\text{th}}$  insect:

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r} (x_j - x_i) + \alpha(\text{rand} - 0.5) \quad (5)$$

**Results and Discussion:**

Considering the fact that precipitation occurred in all twelve months of the year in the basin and there was no zero rainfall in any month, therefore the data from April to March were considered for the analysis. Due to the correlation coefficient of less than 0.6 for the rain and height in all months, Kriging and IDW methods were used for the spatial analysis of rainfall. Considering that the error value of the IDW method was lower, this method was also suitable for the regions with many ups and downs. Therefore, this method was used to calculate the variance of the estimation error in this research. After calculating the variance of the estimation error of each month, the layers of different months were weighed, and ultimately the final layer of the estimation variance was obtained for the basin. In this layer, it was possible to identify the points with high estimates which required more sampling. However, it cannot be commented in relation to the number of stations and their simultaneous effects when constructed. The maximum estimation variance was found to be greater in the northern, eastern, and southern boundaries of the basin where the distance between the stations was greater. Besides, in the mountainous areas where rainfall changes were more, the maximum estimation variance was greater.

**Conclusions**

- The spatial analysis of rainfall was carried out by using IDW geostatistical method in the basin. The monthly variance layers of the estimate were weighed after calculating the variance of the rainfall estimates for each month, based on the weight of rainfall in each month, equaling to the long-term average of the rainfall of the stations in the month. Then, the final layer of the estimation variance was obtained from the weighted average method which was prepared for the future studies and finding the potential points with the highest value of the error variance. One of the selected criteria in the structure of the rain gauge network optimization model was used to localize the rain gauge stations. According to the results of the maximum estimation variance, the more variance was observed in the northern, eastern, and southern boundaries of the basin where

the distance between the stations was more, and also in the mountainous areas where rainfall changes were higher.

- In this research, Alpha parameter was investigated and its value was proposed to be 0.1 according to the optimal value of the Sphere function. In order to carry out the process of the optimization, a model was, thus, developed to determine the appropriate points for the establishment of new stations in the basin. The main goals of the model are to maximize the minimum entropy of the data transmission, minimize the value of the variance of the error, and eventually determine the potential points for the establishment of the new station by using the firefly algorithm. By implementing the proposed model in the basin of Urmia Lake, there were 9 new rain gauge stations to be added to the localization network. The proposed stations were localized in the border regions and mountainous areas with high rainfall variations. The results of this research are effectively used in planning for the development of the rainfall measurement network, and the allocation of the available budget in places where the density of the stations is low. Finally, it is suggested to compare the results obtained from geostatistical methods with the physical realities and the conditions of installation and operation of the station by conducting field observations. This way, we may realize some of the reasons of the changes in the station's operation from the results of this method without doing field observations or spending more time and money. Obviously, the results of any scientific method based on the statistics and recorded information in monitoring stations will always be affected by the quality, accuracy and quantity of the statistics and the data used. Thus, systematic development of the monitoring networks and improving the quality of data gathering should be considered in conducting future studies.

### Acknowledgment

The authors would like to thank the staff of the Regional Water and Meteorological Organization for their assistance in providing the data for this research.

### References

- 1- Karamouz, M., Falahi, M. and Nazif, S., 2010. Analysis of Spatial Variation of Precipitation: Comparison of Conventional and Kriging Methods (In Persian).
- 2- Putthividhya, A. and Tanaka, K., 2013. Optimal rain gauge network design and spatial precipitation mapping based on geostatistical analysis from collocated elevation and humidity data. *Int. J. Environ. Sci. Develop*, 3, pp.124-129.
- 3- Yang, X.S. and He, X., 2013. Firefly algorithm: recent advances and applications. *International Journal of Swarm Intelligence*, 1(1), pp.36-50.



© 2019 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## ارزیابی و بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی بر مبنای روش‌های زمین‌آماری و الگوریتم کرم شب‌تاب (مطالعه موردی: حوضه آبریز شرق دریاچه ارومیه)

المیرا ولی‌پور<sup>۱\*</sup>، محمدعلی قربانی<sup>۲</sup> و اسماعیل اسدی<sup>۳</sup>

\*- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز Elmira.valipoor@yahoo.com

۲- استاد دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۳- استادیار دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۹

بازنگری: ۱۳۹۷/۱/۲۵

دریافت: ۱۳۹۶/۲/۳

### چکیده

کیفیت مناسب اطلاعات آبدهی ثبت شده در شبکه‌های باران‌سنجی در طراحی پایدار پروژه‌های آبی نقش مهمی ایفا می‌کند. از این نظر برای ایجاد شبکه‌ای بهینه و کارآمد، شبکه‌های باران‌سنجی باید به صورت دوره‌ای با توجه به نیاز و طرح‌های توسعه منابع آب پیش‌روی، مورد ارزیابی قرار گیرند. در این مطالعه ابتدا داده‌های بارش ماهانه ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوضه شرق دریاچه ارومیه و مناطق مجاور آن جمع‌آوری و شبکه باران‌سنجی اولیه ایجاد شد. در ادامه از روش‌های کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله برای ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه استفاده شده است. نتایج نشان داد از ۳۶ ایستگاه مورد مطالعه، شش ایستگاه وضعیت بحرانی داشته، از این نظر صحت اطلاعات ثبت شده در این ایستگاه‌ها مورد تردید می‌باشد. در واقع نقاط دارای حداکثر واریانس تخمین در سطح حوضه، معیاری در تعیین نقاط با پتانسیل تأسیس ایستگاه جدید در نظر گرفته شد. در نهایت با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب، بهترین جانمایی برای ایستگاه‌های موجود و ایستگاه‌های پتانسیل به دست آمد. بطوریکه، بهترین جانمایی، با اضافه کردن تعداد نه ایستگاه به دست آمد.

کلید واژه‌ها: الگوریتم کرم شب‌تاب، بهینه‌سازی، زمین‌آمار و شبکه‌ی باران‌سنجی.

### مقدمه

بارندگی محرک اصلی در چرخه هیدرولوژی حوضه می‌باشد. از عوامل هواشناسی است که دارای تغییرات زمانی و مکانی می‌باشد. بدین منظور مطالعه توزیع مکانی بارندگی نیاز به تعداد زیادی نقاط دیده‌بانی دارد که در منطقه مورد نظر به خوبی توزیع شده باشند. (Mahmoudi-Meimand et al., 2016). مناسب بودن تراکم و توزیع باران‌سنجی در شبکه‌های باران‌سنجی هر منطقه، گامی مؤثر در موفقیت طرح‌های آبی و برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای و استفاده مؤثر از اطلاعات می‌باشد (Karamouz et al., 2010). محققان بسیاری نشان دادند که روش پیش‌بینی زمین‌آمار، نسبت به روش‌های سنتی، برآورد بهتری از بارندگی منطقه‌ای فراهم می‌سازد. Sepaskhah و Ghahraman (2001) با استفاده از روش کاهش واریانس کریجینگ روی داده‌های بارش با تداوم یک ساعت و دوره بازگشت ۱۰ سال در ایستگاه‌های سینوپتیک ایران، مقدار واریانس خطای تخمین کریجینگ و ضریب تغییرات نسبی، موقعیت جدیدی را در جهت احداث ایستگاه به منظور کاهش خطای تخمین بارندگی

پیشنهاد کردند. Papamichai و Metaxa (1996) به منظور ارزیابی مکانی بارش و بهینه‌سازی شبکه‌ی باران‌سنجی تایوان با استفاده از داده‌های بارش ساعتی و سالیانه، از روش زمین‌آمار بهره گرفتند. آن‌ها مشخص نمودند که بارش‌های ساعتی نسبت به بارش‌های سالیانه، تغییرات مکانی بیشتری دارند. همچنین، ارزیابی شبکه بر اساس درصد منطقه با دقت قابل قبول (حاصل از واریانس کریجینگ) انجام شد و طراحی بهینه‌ی شبکه‌ی باران‌سنجی صورت گرفت. Haberlandt (2007) در حوضه رودخانه الهه در آلمان، نشان داد کریجینگ معمولی در مقایسه با روش‌های میان‌یابی تک متغیره شامل نزدیک‌ترین همسایگی، تبسن، عکس مجذور فاصله و کریجینگ شاخص، دقیق‌تر می‌باشد. Barca et al. (2008) از روش‌های احتمال، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و دو معیار کمینه‌سازی متوسط کمترین فاصله واریانس تخمین کریجینگ معمولی، برای ارتقای شبکه باران‌سنجی موجود در منطقه‌ای در جنوب ایتالیا استفاده کردند. Cheng et al. (2008) توزیع مکانی مناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی را وابسته به درک درست از

نتایج به دست آمده از روش‌های مذکور محاسبه نمایند. آنها همچنین همبستگی میان ارتفاع، رطوبت و دما را با مقادیر بارندگی ثبت شده مورد بررسی قرار داده، دریافتند که ارتفاع از همبستگی قابل توجهی با بارش‌های مانسون (Monsoon) برخوردار می‌باشد. در حالی که رطوبت و دما با بارندگی‌های ماهانه، همبستگی داشتند. Yang و He (2013) با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری کرم شب‌تاب، نتیجه گرفتند این الگوریتم بهتر از راهبرد بهینه جستجو متناوب است.

با توجه به مشکلات حادث شده برای دریاچه ارومیه، انجام مطالعات جامع با رویکردی همه جانبه در حوضه آبریز، ضروری به نظر می‌رسد. به منظور بررسی مشکلات هدف اصلی این پژوهش چگونگی بهینه‌سازی شبکه مجموعه ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه با استفاده از واریانس برآورد کریجینگ با توجه به توپوگرافی و وضعیت برونابی داده‌ها و همچنین الگوریتم کرم شب‌تاب در منطقه شمال غرب ایران می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد بررسی

حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شمال غرب کشور قرار گرفته است. این حوضه به وسیله بخش شمالی کوه‌های زاگرس و دامنه‌های جنوبی کوه سبلان و نیز دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند احاطه شده است. این حوضه از سمت شمال به حوضه آبریز رودخانه ارس، از سمت مشرق و جنوب به حوضه آبریز رودخانه قزل اوزن و از سمت غرب به مرز کشور ترکیه و عراق محدود می‌شود. حوضه دریاچه ارومیه بین مرزهای جغرافیایی  $12^{\circ} 44'$  تا  $55^{\circ} 47'$  طول شرقی و  $35^{\circ} 40'$  تا  $38^{\circ} 5'$  عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع آن از سطح آزاد دریا ۱۲۷۵ متر می‌باشد. مساحت حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۵۲۳۵۵ کیلومترمربع است. تلخه رود (آجی چای)، سیمینه رود، زربینه رود و نازلو از مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد.

### آمار و اطلاعات

در این پژوهش داده‌های بارش با دوره آماری ۴۲ ساله از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲ شامل ۳۶ ایستگاه برای حوضه آبریز شرق دریاچه ارومیه شکل (۱) مورد استفاده قرار گرفتند. بدیهی است که در تشکیل دوره آماری یاد شده، بازسازی آمار نیز صورت گرفته است. البته میزان بازسازی آمار در همه ایستگاه‌ها کمتر از ۲۰ درصد طول دوره آماری بوده است. دو آزمون کلموگراف-اسمیرنوف و اندرسون-دارلینگ روی داده‌ها انجام گرفت. سپس با توجه به نتایج دو آزمون توزیع بارندگی سالانه ایستگاه‌های منطقه تعیین شد. سپس با استفاده از آزمون گرویز - بک داده‌های پرت ایستگاه‌ها تعیین شدند.

فاکتورهای هواشناسی و توپوگرافی منطقه اعلام کردند. آنها از روش کریجینگ برای تخمین میزان بارش در سطح حوضه دریاچه شیمین (Shimen) بهره برده و با محاسبه آنتروپی، موقعیت مناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی را مورد بررسی قرار دادند. Abedini و Shaghaghian (2009) برای طراحی شبکه باران‌سنجی، از ترکیب روش زمین‌آماری و تجزیه‌ی عاملی همراه با روش خوشه‌بندی با اولویت‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی، از نظر محتوای اطلاعات، استفاده کردند. Mashal et al. (2008) در تحقیقی به منظور بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی استان خوزستان، از بین روش‌های مختلف برآورد مقادیر، از روش‌های زمین‌آماری استفاده نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که روش کریجینگ نسبت به روش وزن‌دهی عکس فاصله دقت بالاتری در تخمین مقادیر دارد. ایشان همچنین از دو معیار ارزیابی حاصل از نتایج اعتبارسنجی حذفی استفاده کرده و پنج باران‌سنج، که با استفاده از سایر نقاط شبکه با دقت قابل قبولی قابل تخمین بودند، برای حذف از شبکه پیشنهاد نمودند. به دنبال آن در مرحله ایجاد باران‌سنج‌های جدید، با استفاده از ارزیابی خطای تخمین روش کریجینگ، سه محل در سطح منطقه، به عنوان باران‌سنج جدید پیشنهاد کردند. Karamouz et al. (2010) در تحلیل مکانی بارش، مقایسه‌ی روش‌های کریجینگ با سایر روش‌های متداول دیگر را در ۳۸ ایستگاه باران‌سنجی واقع در محدوده‌ی غرب کشور، مطالعه نمودند. آنها نتایج به دست آمده از روش‌های درون‌یابی هر ایستگاه با مقادیر ثبت‌شده‌ی هر ایستگاه، مقایسه نمودند. نتایج نشان داد روش کریجینگ عام نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی، نتایج بهتری به دست می‌دهد. در نهایت تعدادی ایستگاه جدید به منظور بهینه‌سازی شبکه‌ی باران‌سنجی پیشنهاد نمودند.

بهینه‌سازی عبارت است از یافتن مقادیری از پارامترهای یک تابع، که تابع را کمینه یا بیشینه نماید. الگوریتم‌های بهینه‌سازی، هر دو نوع مسائل بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی را پوشش می‌دهند. الگوریتم کرم شب‌تاب مدلی تکاملی است که مبتنی بر الگوریتم‌های هوش جمعی و برگرفته شده از طبیعت می‌باشد. الگوریتم کرم شب‌تاب با ایجاد یک جمعیت اولیه، از راه‌حل‌های کاربردی آغاز می‌گردد سپس به صورت مکرر از نسلی به نسل دیگر در جهت بهترین راه‌حل حرکت می‌کند. در تکرارهای موفق الگوریتم، انتخاب در مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها انجام می‌گیرد (Hassanzadeh et al., 2011). در زمینه بهینه‌سازی با الگوریتم کرم شب‌تاب مطالعاتی انجام گرفته است. Putthividhya و Tanaka (2013) از روش زمین‌آماری برای بررسی کیفیت تخمین بارندگی در حوضه رودخانه چاو‌فرایا (Chao Phraya) بهره بردند. آن‌ها با ترسیم شبکه تیسن و هم‌چنین ترسیم خطوط هم‌باران، با روش‌های عکس فاصله و کریجینگ معمولی، سعی کردند تا اختلاف داده‌های بارندگی را به

در بررسی آمار کلاسیک، داده‌هایی که از کل جامعه به‌منظور شناخت آن جامعه مورد بررسی قرار می‌گیرند، فاقد اطلاعات موقعیتی فضا بوده و در نتیجه مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص، هیچگونه اطلاعاتی در مورد مقدار همان کمیت در نمونه‌های دیگر، به فاصله معین از نمونه مذکور، ارائه نمی‌دهد. در حالیکه در زمین آمار علاوه بر تعیین مقدار یک کمیت در یک نمونه، ساختار فضائی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در زمین آمار، هر نمونه تا یک حداکثر فاصله معین با نمونه‌های اطراف خود ارتباط فضائی دارد. این فاصله حداکثر که دامنه تأثیر (Range) نامیده می‌شود، اهمیت فراوانی دارد. در واقع از این فاصله به بعد، نمونه‌ها روی یکدیگر اثر نخواهد داشت. این فاصله، نشان‌دهنده‌ی فضائی است که تخمین‌گرهای زمین‌آمار می‌توانند، جهت برآورد مقدار کمیت، مورد استفاده قرار دهند (Abedini and Shaghaghian, 2009).

با توجه به این آزمون، ۶۱ داده به‌عنوان داده پرت تشخیص داده شدند که پس از بررسی مجدد و مقایسه با ایستگاه‌های مجاور، ۹ داده پرت و نامحتمل، مشخص و حذف شدند. همگنی داده‌ها در تمام ایستگاه‌های باران‌سنجی با روش آزمون‌های نرمال استاندارد (Standard Normal Homogeneity Test)، آزمون همگنی دامنه بیشند، آزمون همگنی پتیت (Pettit) و آزمون نسبت وان نیومن (Von Neuman) بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از این آزمون‌ها، ۹۱/۷ درصد از ایستگاه‌های منتخب حوضه، از لحاظ صحت و درستی داده‌های بارندگی ثبت‌شده مورد تأیید بوده و در تحلیل‌های هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گرفتند (Ghajarnia et al., 2015).

### زمین آمار

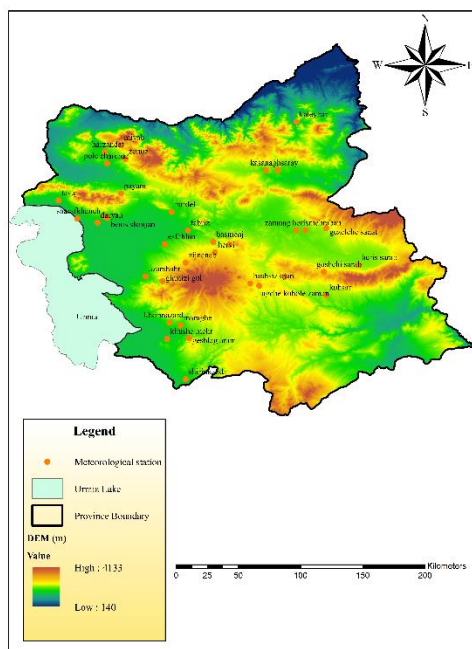


Fig. 1 -Location Map of the study area at East Basin of Urmia Lake and studied stations

شکل ۱- نقشه حوضه شرق دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

## روش‌های تخمین

روش‌های مختلفی برای تخمین وجود دارد که در زیر به شرح مهم‌ترین روش‌ها یعنی کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله پرداخته می‌شود.

## کریجینگ

به‌طور کلی، تخمین زمین‌آماری، فرآیندی است که طی آن، می‌توان مقدار یک کمیت در نقطه‌ای، با مختصات معلوم را، با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم، به‌دست آورد. نام این تخمین‌گر زمین‌آماری به افتخار یکی از پیشگامان علم زمین‌آمار به نام کریج (Kriging)، که یک مهندس معدن آفریقای جنوبی بود، به نام کریجینگ (Kriging) نام‌گذاری شد. روش کریجینگ بر اساس میانگین متحرک وزن‌دار بوده و می‌توان آن را بهترین تخمین‌گر خطی ناریب خواند. معادلات کریجینگ: فرمول کلی روش کریجینگ مانند سایر تخمین‌گرها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (۱)$$

که در آن  $Z^*(x_i)$  مقدار تخمین متغیر در نقطه‌ی موردنظر،  $\lambda_i$  وزن یا اهمیت نمونه  $\lambda$ ام،  $n$  تعداد مشاهدات و  $Z(x_i)$  مقدار مشاهده شده متغیر می‌باشد (Safarrad et al., 2013).

## روش وزن‌دهی عکس فاصله

در این شیوه مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم به‌دست می‌آید. به عبارت دیگر در روش وزن‌دهی عکس فاصله (Inverse Distance Weighting) ارزش یک متغیر بر اساس میانگین همسایه‌ها در محدوده‌های معین محاسبه می‌شود. به این ترتیب که معکوس فواصل از نقاط مجهول، وزن‌دهی می‌شود، هرچه فاصله نقاط مجهول از نقاط معلوم کاهش یابد وزن ارزش آن نقاط افزایش می‌یابد و نقاطی که ارزش آن نامعلوم است با استفاده از نقاط اطراف در یک شعاع مشخص بر اساس فرمول زیر برآورد می‌شود (Hasani, 1999).

$$Z(x) = \frac{1}{n} \sum Z(x_i) \quad (۲)$$

که در آن  $x_i$  ارزش معلوم نقاط با مختصات معلوم و  $x$  ارزش برآورد شده نقطه مجهول می‌باشد و چون این مقدار تابعی از فاصله میان آن‌ها می‌باشد، لذا فواصل میان آن‌ها به‌عنوان وزن مدل به کار می‌رود که معمولاً از توان دوم معکوس فواصل استفاده می‌شود و برای وزن فواصل مقدار توان افزایش می‌یابد. برای تعیین کیفیت ارزیابی هر یک از روش‌های زمین‌آمار و درون‌یابی‌های انجام شده از

پارامتر مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است (López-Moreno and Nogues-Bravo, 2006).

## الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب (Firefly Algorithm)، توسط Yang (2009) بر مبنای رفتار و الگوهای چشمک زن کرم‌های شب‌تاب ارائه گردید. این الگوریتم، یک روش جدید مبتنی بر رفتارهای جمعی است که از رفتارهای اجتماعی کرم شب‌تاب در طبیعت الهام گرفته است و به‌عنوان یکی از روش‌های قدرتمند در حل مسائل بهینه‌سازی شناخته شده است. کرم‌های شب‌تاب نورهای موزون و کوتاه تولید می‌کنند. الگوی نوری هر کدام از کرم‌های شب‌تاب با یکدیگر متفاوت می‌باشند. کرم‌های شب‌تاب از این نورها به دو منظور استفاده می‌کنند. پروسه جذب جفت‌ها و دیگری به منظور شکار می‌باشد. نورهای ساطع شده، به‌عنوان مکانیزم حفاظتی برای کرم‌های شب‌تاب عمل می‌نماید. نورهای با آهنگ منظم، نرخ تابیدن نور و میزان فاصله زمانی که بین سیگنال‌های نور وجود دارند، سبب جذب کرم شب‌تاب‌ها به یکدیگر می‌شوند. موضوعات مهم در الگوریتم کرم شب‌تاب، تغییرات شدت نور روشنایی و فرموله کردن جذابیت حشرات است. به‌منظور سادگی، فرض می‌شود که جذابیت حشرات، شدت روشنایی آن‌ها است. در حالت کلی جذابیت، پارامتری نسبی بوده و از دید حشرات دیگر، سنجیده می‌شود. همچنین به فاصله حشرات از یکدیگر نیز بستگی دارد. رابطه جذابیت، با تغییر فاصله حشرات، به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r} \quad (۳)$$

که در آن  $\beta_0$  بیانگر بیشینه جذابیت با دامنه تغییرات  $[0, 1]$  می‌باشد.  $\gamma$  بیانگر ضریب جذب با دامنه تغییرات  $[0, \infty]$  است.  $r$  بیانگر فاصله حشره  $\lambda$ ام از حشره  $\lambda$ ام می‌باشد. رابطه (۴) معادله  $r_{ij}$  را نشان می‌دهد (Abedini and Shaghaghian, 2009).

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (۴)$$

حرکت حشره  $\lambda$ ام به سمت حشره  $\lambda$ ام با رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r} (x_j - x_i) + \alpha(\text{rand} - 0.5) \quad (۵)$$

به طور کلی به‌منظور توسعه الگوریتم کرم شب‌تاب از سه قانون ایده‌آل استفاده شده است. قوانین مزبور به شرح ذیل می‌باشند.

حرکت کرم شب‌تاب‌ها دو رویکرد متفاوت وجود دارد. در رویکرد اول، هر حرکت کرم شب‌تاب مورد نظر به سمت کرم شب‌تاب پر نورتر، به‌عنوان موقعیت جدید در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در رویکرد دوم، حرکت کرم شب‌تاب مورد نظر، بر اساس برآمد نهایی، حرکت به سمت تمام کرم شب‌تاب‌های پر نور است. در حرکت کرم شب‌تاب‌ها در رویکرد اول، حرکت ذرات صرفاً با توجه به مقدار یک کرم شب‌تاب انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر، بهینه محلی تحقق یافته می‌باشد و بهینه سراسری تأثیری در روال جستجوی الگوریتم ندارد. به همین دلیل فضای مسئله به صورت بهینه مورد جستجو قرار نمی‌گیرد. از این رو تعداد تکرار بیشتری برای رسیدن به نقطه بهینه نیاز است.

برای رفع این مشکل و سهیم شدن ذرات دیگر در حرکت ذرات و بهینه شدن عمل جستجوی الگوریتم، روش جدیدی پیشنهاد شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در نظر گرفتن هر دو رویکرد در حرکت کرم شب‌تاب‌ها، با دقت بهتری می‌تواند نقطه بهینه را در فضای جستجو بیابد (Hassanzadeh et al., 2011).

### نتایج و بحث

در این مطالعه از سری زمانی بارش ماهیانه به‌منظور تحلیل‌های مکانی استفاده شده است. با توجه به اینکه در تمام دوازده ماه از سال، بارش در حوضه اتفاق می‌افتد و در هیچ ماهی تقریباً بارندگی صفر وجود ندارد، بنابراین در تحلیل‌ها اطلاعات ماه‌های فروردین تا اسفند مد نظر قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی همبستگی بارش و ارتفاع در ماه‌های مورد بررسی در جدول (۱) آمده است. با توجه به ضریب همبستگی کوچکتر از ۰/۶ بارندگی و ارتفاع، برای تمام ماه‌ها از روش کریجینگ و IDW برای تحلیل مکانی بارش استفاده شد (Yazdani et al., 2013). مقدار پارامتر مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) با روش‌های IDW و کریجینگ در جدول (۲) آورده شده است. با توجه به اینکه مقدار خطای روش IDW کمتر می‌باشد و همچنین این روش برای مناطقی که دارای پستی و بلندی زیادی هستند، مناسب می‌باشد. بنابراین در این تحقیق برای محاسبه واریانس خطای تخمین از این روش استفاده شده است.

پس از محاسبه واریانس خطای تخمین هر ماه (به‌عنوان نمونه، لایه‌ی واریانس تخمین مربوط به ماه بهمن در شکل (۲، الف)، لایه‌های مربوط به ماه‌های مختلف با توجه به جدول (۳) وزن‌دار می‌شود و در نهایت لایه نهایی واریانس تخمین مربوط به حوضه به‌دست می‌آید (شکل ۲، ب).

در این لایه امکان شناسایی نقاط با مقدار تخمین بالا و نیازمند نمونه‌برداری بیشتر وجود دارد، البته نمی‌توان در ارتباط با تعداد

قانون اول - همه کرم‌های شب‌تاب از یک جنس در نظر گرفته می‌شوند. بگونه‌ای که یک کرم شب‌تاب به کرم شب‌تاب دیگر، صرفنظر از جنسیتش، جذب خواهد شد.

قانون دوم - جذابیت با روشنایی یک کرم شب‌تاب متناسب است. بنابراین برای هر کرم شب‌تاب چشمک زن، یکی با روشنایی کمتر به سوی دیگری با درخشندگی بیشتر حرکت خواهد کرد. جذابیت با روشنایی متناسب است و هر دوی آن‌ها هر چه فاصله افزایش یابد، کاهش می‌یابند. اگر هیچ یک از کرم‌های شب‌تاب روشنتر از دیگری نباشد، کرم شب‌تاب به طور تصادفی حرکت خواهد کرد.

قانون سوم - روشنایی یک کرم شب‌تاب بوسیله چشم‌انداز تابع هدف تعیین می‌شود (Yazdani et al., 2013). کد حاوی مراحل الگوریتم کرم شب‌تاب که بر اساس قوانین فوق‌الذکر تدوین شده، بشرح ذیل آورده شده است.

```
Objective function f(x),  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ 
Generate initial population of fireflies  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Light intensity  $I_i$  at  $x_i$  is determined by  $f(x_i)$ 
Define light absorption coefficient  $\gamma$ 
While ( $t < MaxGeneration$ )
For  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies
For  $j = 1 : n$  all  $n$  fireflies
If ( $I_j > I_i$ )
Move firefly  $i$  towards  $j$  in  $d$ -dimension
End if
Attractiveness varies with distance  $r$  via  $\exp[-\gamma r]$ 
Evaluate new solutions and update light intensity
End for  $j$ 
End for  $i$ 
Rank the fireflies and find the current best
End while
Postprocess results and visualization.
End.
```

نحوه‌ی عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) بدین صورت است. ابتدا تعدادی کرم شب‌تاب مصنوعی به طور تصادفی در دامنه‌ی مساله توزیع می‌شوند. سپس هر کرم شب‌تاب از خود نوری ساطع می‌کند که شدت آن متناسب با میزان بهینگی نقطه‌ای است که کرم شب‌تاب در آن واقع شده است. سپس شدت نور هر کرم شب‌تاب مرتباً با شدت نور سایر کرم شب‌تاب‌ها، مقایسه شده و کرم شب‌تاب کم نورتر به سوی کرم‌های شب‌تاب پر نورتر جذب می‌شود. این عمل باعث می‌شود که ذرات به اطراف ذره‌ای که نور بیشتری دارد، متمرکز شوند. چنانچه در تکرار بعدی الگوریتم، ذره‌ای با نور بیشتر وجود داشته باشد، ذرات مجدداً به سمت آن حرکت می‌کنند. در



ایستگاه‌ها و اثر هم زمان آنها در صورت اظهاری نظر کرد. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه واریانس تخمین، بیشتر در مرزهای شمالی، شرقی و جنوبی حوضه، جاهایی است که فاصله ایستگاه‌ها بیشتر است، همچنین در نقاط کوهستانی که تغییرات بارندگی بیشتر است.

جدول ۱- ضریب همبستگی ارتفاع با متوسط بارندگی ماهیانه ایستگاه‌های حوضه

Table 1- Correlation coefficient of altitude with mean monthly rainfall of basin stations

Esf.	Bah.	Dey	Aza.	Aba.	Meh.	Sha.	Mor.	Tir	Kho.	Ord.	Far.	Month correlation coefficient
-0.17	-0.13	-0.15	-0.23	-0.14	-0.14	-0.18	-0.25	-0.35	-0.22	-0.01	0.14	

جدول ۲- مقدار مجذور میانگین مربعات خطا با روش‌های IDW و کریجینگ

Table 2- Root mean squared error with IDW and kriging methods

Root mean squared error with kriging methods	Root mean squared error with IDW	Month
24.97	18.21	Far.
31.33	22.58	Ord.
17.93	13.26	Kho.
9.19	6.98	Tir
9.48	7.50	Mor.
11.19	14.55	Sha.
18.71	14.74	Meh.
14.67	11.78	Aba.
12.33	9.43	Aza.
12.96	10.41	Dey
18.07	13.48	Bah.
79.15	42.12	Esf.

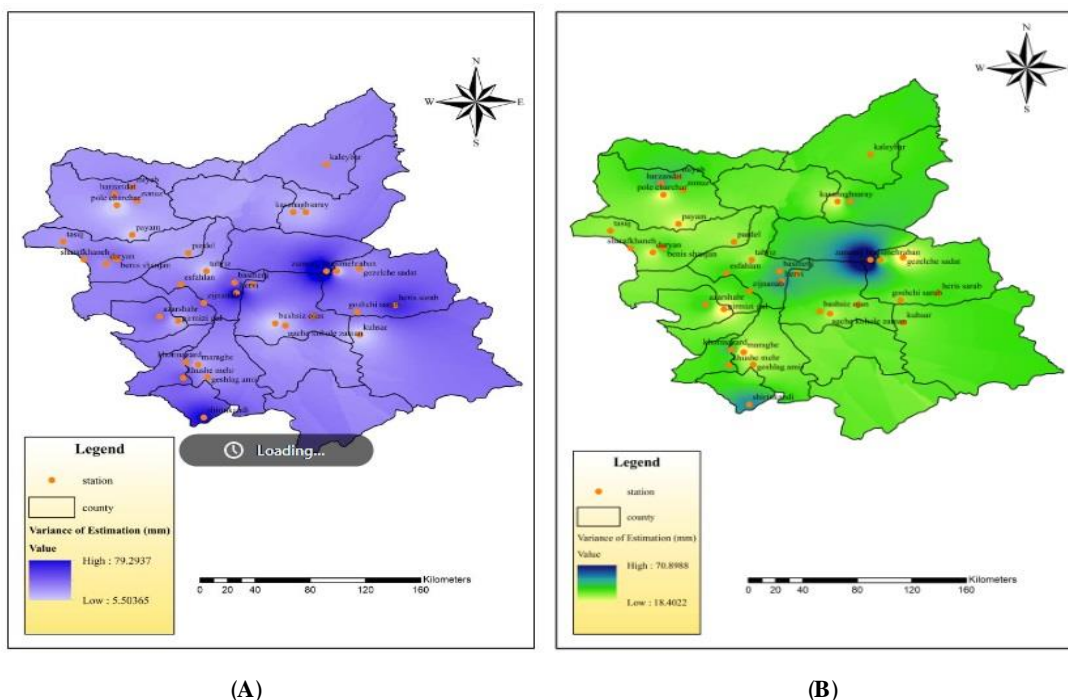


Fig. 2 - Estimated variance layers at basin level; a) Bahman layer b) final layer

شکل ۲- لایه‌های واریانس تخمین در سطح حوضه؛ الف) ماه بهمن، ب) لایه نهایی

جدول ۳- ضرایب (میلی‌متر) مربوط به هر ماه برای وزن‌دار کردن لایه‌های واریانس تخمین

Table 3. Coefficients (mm) for each month to weigh the estimated variance layers

Esf.	Bah.	Dey	Aza.	Aba.	Meh.	Sha	Mor.	Tir	Kho.	Ord	Far.
30.09	25.08	22.57	27.71	41.73	27.01	19.01	15.61	18.47	32.25	60.03	42.51

$$\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1 \quad (12)$$

$$a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} \in [0,1] \quad (13)$$

از آنجا که دامنه تغییرات آنتروپی انتقال اطلاعات و واریانس خطا متفاوت است، برای مقایسه این دو معیار از اعداد استاندارد شده استفاده می‌شود تا داده‌های واریانس خطا بین صفر و یک تأثیر یکسانی در ارزیابی نهایی تابع هدف داشته باشد. برای استاندارد سازی این معیار از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود (Hassanzadeh et al., 2011).

$$Errs_{ij} = \frac{Err_{ij} - Err_{min}}{Err_{max} - Err_{min}} \quad (14)$$

که  $Err_{ij}$  و  $Ent_{ij}$  به ترتیب مقدار واقعی آنتروپی و خطای واریانس است.  $Ent_{min} = \min(Ent_{ij})$  و  $Err_{max} = \max(Err_{ij})$  به ترتیب مقدار کمینه‌ی آنتروپی و بیشینه خطای واریانس است. همچنین، در تابع هدف بالا  $Errs_{max} = \max(Errs_{ij})$  مقدار بیشینه استاندارد خطای واریانس برابر یک است. همچنین،  $Ent_{min} = \min(Ent_{ij})$  مقدار کمینه‌ی آنتروپی انتقال اطلاعات و برابر صفر است.  $r_1$  مقدار آستانه برای انتخاب نقاط در محدوده آنتروپی انتقال اطلاعات و  $r_2$  مقدار آستانه برای انتخاب نقاط در محدوده خطای واریانس است.

برای مکان‌یابی ایستگاه‌های جدید از نقاط پتانسیل با کمینه آنتروپی انتقال اطلاعات استفاده می‌شود، بنابراین متغیر  $b_{ij}$  تعریف می‌شود که در صورت برقراری شرط  $Ent_{ij} < r_1$  (یعنی، نقاط پتانسیلی که مقدار آن‌ها از یک مقدار خاص آنتروپی انتقال اطلاعات کمتر است)، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد. مقدار یک به معنی این است که شرط مسئله برقرار است و الگوریتم برای مراحل بعد بررسی می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به مقدار واریانس تخمین، نقاطی برای مکان‌یابی ایستگاه مناسب‌اند که دارای بیشینه واریانس تخمین باشند. بنابراین، متغیر  $c_{ij}$  تعریف می‌شود که در صورت برقرار بودن شرط  $Errs_{ij} > r_2$  (یعنی نقاط پتانسیلی که مقدار آنها از یک مقدار خاص واریانس خطا بالاتر باشد) مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.  $a_{ij}$  متغیر تصمیم است که در صورت برقراری هر دو شرط  $Ent_{ij} < r_1$  و  $Errs_{ij} > r_2$  مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر می‌گیرد.

### نتایج الگوریتم کرم شب‌تاب

در این بخش، در ابتدا پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب مورد بررسی قرار گرفته و سعی شده با تنظیم صحیح پارامترها، نتایج حاصل از الگوریتم بهبود داده شود. از مهم‌ترین پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب پارامتر آلفا و گاما می‌باشند. که در این تحقیق پارامتر آلفا مورد بررسی قرار گرفته شده است. مقدار پیشنهاد شده برای این پارامتر ۰/۲ می‌باشد (Abedini and Shaghaghian, 2009). اما با توجه به اینکه ماهیت الگوریتم کرم شب‌تاب استخراج‌گر (Exploitive) می‌باشد برای بهبود حرکات تصادفی ذرات و ایجاد تعادل بین خصوصیات الگوریتم می‌توان مقدار این پارامتر را با سعی و خطا به دست آورد. بدین منظور مقادیر مختلف این پارامتر برای یافتن نقطه بهینه توابع مختلف در ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت و بهترین مقدار برای این پارامتر ۰/۱ تعیین شد. مکان-یابی صحیح ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی در بهبود تخمین بارش منطقه‌ای با حداقل هزینه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه مدلی برای تعیین نقاط مناسب برای تأسیس ایستگاه‌های جدید در سطح حوضه‌ی آبخیز توسعه داده شده است. اهداف اصلی مدل توسعه داده شده عبارت‌اند از:

(۱) بیشینه کردن حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات

(۲) کمینه کردن مقدار واریانس خطا

بنابراین تابع هدف پیشنهادی به صورت زیر تعریف شده است:

$$\text{Min } Z = a_{ij} \left\{ \alpha_1 (Errs_{ij} - Errs_{max})^2 + \alpha_2 (Ent_{ij} - Ent_{max})^2 \right\} \quad (6)$$

$$a_{ij} = b_{ij} \times c_{ij} \quad (7)$$

$$b_{ij} > \frac{r_1 - Ent_{ij}}{r_1} \quad (8)$$

$$b_{ij} < \frac{r_1}{Ent_{ij}} \quad (9)$$

$$c_{ij} > \frac{Errs_{ij} - r_2}{r_2} \quad (10)$$

$$c_{ij} < \frac{Errs_{ij}}{r_2} \quad (11)$$

قرار گرفتند. همچنین، به دلیل اهمیت یکسان هر دو معیار، مقادیر  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد.

بر طبق نتایج به دست آمده مشاهده می شود که الگوریتم کرم شب تاب پیشنهادی با در نظر گرفتن هر دو برداشت حرکت، توانسته با دقت بهتری نقطه بهینه را بیابد. نتایج به دست آمده فاصله زیادی با نتایج حاصل از الگوریتم حاصل از یک نوع حرکت دارد. در این ارزیابی الگوریتم (FA) ۱۰۰ بار اجرا شده و بهترین جواب حاصل از این اجرا در شکل های (۳) و (۴) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن هر دو نوع حرکت بسیار بهتر از الگوریتم کرم شب تاب حاصل از یک برداشت حرکت می باشد و خطا کاهش یافته است. در نهایت با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب، بهترین جانمایی برای ایستگاه های موجود و ایستگاه های پتانسیل به دست آمد. به طوری که، بهترین جانمایی، با اضافه کردن تعداد نه ایستگاه به دست آمد که در شکل (۵) قابل مشاهده است.

$a_{ij}$  وقتی مقدار یک می گیرد که هر کدام از متغیرهای  $a_{ij}$  و  $b_{ij}$  مقدار یک بگیرند، در این صورت الگوریتم اجرا می شود و به دنبال نقطه بهینه می گردد، در غیر این صورت مقدار صفر و الگوریتم متوقف می شود.  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  ضرایبی بین صفر و یک هستند که مقدار آن ها با توجه به اهمیت هر کدام از معیارهای تصمیم گیرنده تعیین می شود. ضریب هر معیاری که بیشتر باشد، تأثیر آن معیار در پیدا کردن نقطه ی بهینه بیشتر است. با اجرای تابع هدف بالا (رابطه ۶) نقاط با عدم قطعیت بیشتر (حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات)، همچنین با واریانس خطای بالا مشخص می شود که در واقع نقاط پیشنهادی برای تأسیس ایستگاه های جدید می باشند.

برای اجرای ساختار بهینه، ابتدا باید مقادیر  $r_1$  و  $r_2$  مشخص شود. همان طور که گفته شد این مقادیر برای مشخص کردن محدوده با آنتروپی انتقال پایین و واریانس خطای بالاست، بنابراین با توجه به خصوصیات شبکه باران سنجی منطقه و آزمون و خطا با مقادیر مختلف، در نهایت ۳۰ درصد کمینه ی آنتروپی انتقال اطلاعات،  $r_1 = ۰/۳$  و ۶۰ درصد بیشینه ی خطای واریانس، یعنی  $r_2 = ۶۰$ ، در انتخاب موقعیت بهینه ی تأسیس ایستگاه جدید مدنظر

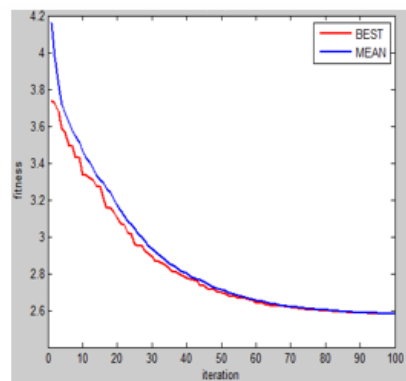


Fig. 3- Results of the best values obtained based on the standard FA algorithm

شکل ۳- نمودار نتایج حاصل از بهترین مقادیر به دست آمده از الگوریتم FA استاندارد

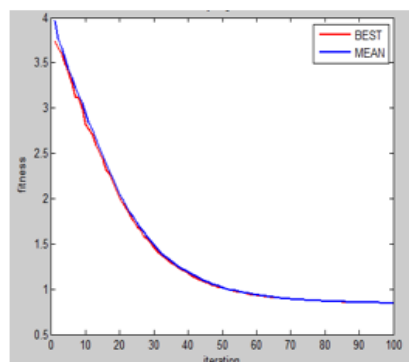


Fig. 4- Results of the best values obtained based on the proposed algorithm FA with all the movements

شکل ۴- نمودار نتایج حاصل از بهترین مقادیر به دست آمده از الگوریتم FA پیشنهادی به همراه تمام حرکت ها

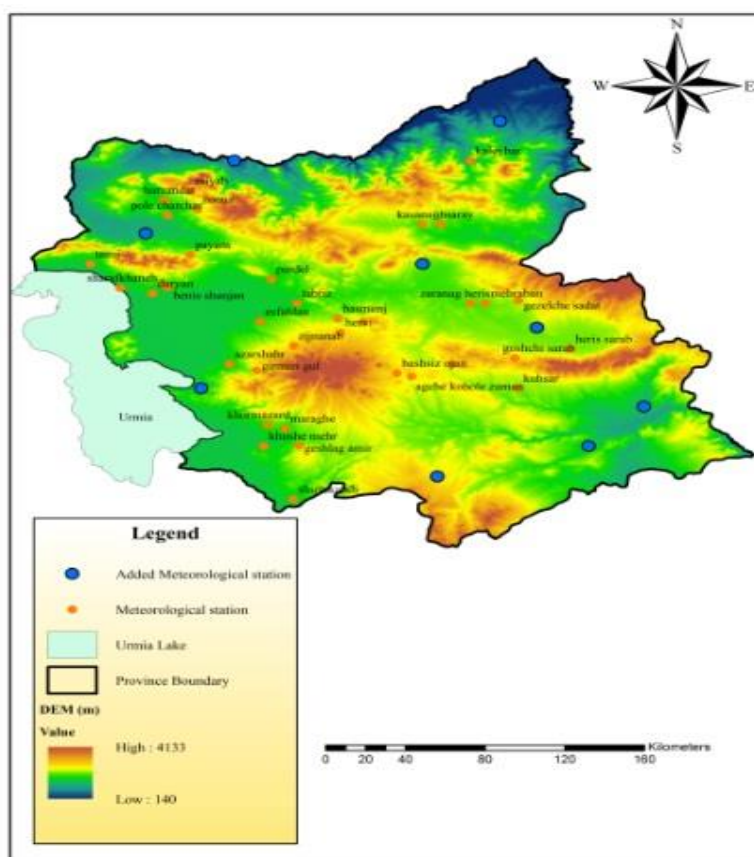


Fig. 5 - Location map of the study area and added new stations located at East Basin of Urmia Lake

شکل ۵- نقشه حوضه شرقی دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های مورد مطالعه و ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی

جدول ۴- مشخصات ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی به دست آمده از ساختار پیشنهادی بهینه‌سازی شبکه

Table 4 - Characteristics of the new rain gauge stations obtained from the structure of the proposed network optimization

Type of station	Geographical characteristics			Station name
	Altitude (m)	latitudes	longitudes	
Meteorolog	1690	37°57'	47°22'	Yengaja
Meteorology	1730	38°18'	46°51'	Goyjeh bel
Meteorology	935	39°05'	47°12'	Mulan
Meteorology	660	38°52'	46°00'	Siyah roud
Meteorology	1244	38°28'	45°36'	Kashk saray
Meteorology	1370	37°37'	45°51'	Rahdar khane shohid madani
Meteorology	1990	37°08'	46°55'	Mostafa kandy
Meteorology	1310	37°17'	47°36'	Kale bouz
Meteorology	1092	37°37'	47°51'	Garm roud

مختلف سال متفاوت است و در طول ماه‌های تر، تخمین دقیق بارش اهمیت بیشتری دارد، بنابراین ماه‌های با بارش بیشتر، وزن بالاتری به خود اختصاص می‌دهند. پس از محاسبه‌ی واریانس تخمین بارش در هر ماه، با توجه به وزن بارش در هر

### نتیجه‌گیری

- تحلیل مکانی بارش با استفاده از روش زمین آماری IDW در سطح حوضه صورت گرفت. از آنجا که اهمیت بارش در ماه‌های

باران‌سنجی جدید برای اضافه شدن به شبکه موقعیت‌یابی شد که مختصات ایستگاه‌های جدید در جدول (۴) قابل مشاهده است. ایستگاه‌های پیشنهادی بیشتر در مناطق مرزی و کوهستانی مکان‌یابی شد که تغییرات بارش زیاد است. همچنین، در نقاطی که تراکم ایستگاه‌ها کم است، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از اطلاعات گسترده‌تر با دوره‌ی زمانی طولانی‌تر در مطالعات آبی دقت مطالعات مشابه در سایر حوضه‌ها را افزایش می‌دهد. نتایج این تحقیق به نحو مؤثری در برنامه‌ریزی برای توسعه شبکه‌ی سنجش بارش و تخصیص بودجه‌ی موجود استفاده می‌شود. در نهایت پیشنهاد می‌شود با انجام پژوهش‌های همراه با بازدیدهای میدانی، نتایج به‌دست آمده از روش‌های زمین‌آماري با واقعیت‌های فیزیکی و شرایط نصب و عملکرد ایستگاه مقایسه شود. بدین ترتیب ممکن است از برخی نتایج این روش بدون انجام بازدیدهای میدانی یا صرف هزینه‌های بیشتر به علت تغییرات نحوه کارکرد ایستگاه مورد نظر پی برد. بدیهی است نتایج به‌دست آمده از هر روش علمی که مبتنی بر آمار و اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های پایش است همواره متأثر از کیفیت، صحت و کمیت آمار و اطلاعات یاد شده خواهد بود. از این نظر توسعه شبکه‌های پایش، ضمن ارتقای کیفیت ثبت آمار و اطلاعات آن‌ها، پیشنهاد بدیهی خواهد بود.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله تشکر ویژه خود را از پرسنل سازمان آب منطقه‌ای و هواشناسی برای همکاری در تأمین داده‌های این تحقیق اعلام می‌دارند.

ماه که برابر با میانگین بلند مدت بارش ایستگاه‌ها در ماه موردنظر است، لایه‌های واریانس تخمین ماهیانه وزن‌دهی می‌شود. سپس، لایه‌ی نهایی واریانس تخمین از روش میانگین وزنی به‌دست می‌آید که برای بررسی‌های بعدی و یافتن نقاط پتانسیل با بالاترین واریانس خطا آماده می‌شود و یکی از معیارهای منتخب در ساختار مدل بهینه‌سازی شبکه‌ی باران-سنجی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های باران‌سنجی به کار می‌رود. همانطور که در شکل (۲، ب) مشاهده می‌شود مقادیر بیشینه واریانس تخمین، بیشتر در مرزهای شمالی، شرقی و جنوبی حوضه، جاهایی است که فاصله ایستگاه‌ها بیشتر است، همچنین در نقاط کوهستانی که تغییرات بارندگی بیشتر است.

• در بخش بهینه‌سازی نیز، در ابتدا پارامترهای الگوریتم کرم شبتاب مورد بررسی قرار گرفته و سعی شده با تنظیم صحیح پارامترها، نتایج حاصل از الگوریتم بهبود داده شود. از مهمترین پارامترهای الگوریتم کرم شبتاب پارامتر آلفا و گاما می‌باشند. که در این تحقیق پارامتر آلفا مورد بررسی قرار گرفته شده است و مقدار آن با توجه به بهینه مقدار تابع اسفیر،  $0/1$  پیشنهاد شده است. به‌منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی مدلی برای تعیین نقاط مناسب برای تأسیس ایستگاه‌های جدید در سطح حوضه آبریز توسعه داده شده است. اهداف اصلی مدل عبارتند از: بیشینه کردن حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات و کمینه کردن مقدار واریانس خطا، در نهایت با استفاده از الگوریتم کرم شبتاب مجموعه نقاط پتانسیل برای تأسیس ایستگاه جدید تعیین می‌گردد. بر طبق نتایج به‌دست آمده (شکل‌های ۳ و ۴) الگوریتم کرم شبتاب پیشنهادی با در نظر گرفتن هر دو رویکرد حرکت، توانسته با دقت بهتری نقطه بهینه را بیابد. با اجرای مدل پیشنهادی در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه، تعداد ۹ ایستگاه

### References

- 1- Abedini, M.J. and Shaghaghian, M.R., 2009. Exploring scaling laws in surface topography. *Chaos, Solitons & Fractals*, 42(4), pp.2373-2383 (In Persian).
- 2- Barca, E., Passarella, G. and Uricchio, V., 2008. Optimal extension of the rain gauge monitoring network of the Apulian Regional Consortium for Crop Protection. *Environmental Monitoring and Assessment*, 145(1-3), pp.375-386.
- 3- Cheng, K.S., Lin, Y.C. and Liou, J.J., 2008. Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(14), pp.2554-2564.
- 4- Ghajarnia, N., Liaghat, A. and Arasteh, P.D., 2015. Comparison and evaluation of high resolution precipitation estimation products in Urmia Basin-Iran. *Atmospheric Research*, 158, pp.50-65 (In Persian).
- 5- Ghahraman, B. and Sepaskhah, A., 2001. Autographic rain-gagenetwork design for iran by kriging. Thesis, *Shiraz University, Iran*. 141p. (In Persian).

- 6- Hassanzadeh, T., Meybodi, M.R. and Mahmoudi, F., 2011. An improved Firefly Algorithm for optimization in static environment. In *Fifth Iran Data Mining Conference/IDMC* (In Persian).
- 7- Hasani, A, 1999, *Geostatic*, Publishing and Printing University of Tehran, 260 (In Persian).
- 8- Haberlandt, U., 2007. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. *Journal of Hydrology*, 332(1), pp.144-157.
- 9- Karamouz, M., Falahi, M. and Nazif, S., 2010. Analysis of Spatial Variation of Precipitation: Comparison of Conventional and Kriging Methods *Iran-Water Resources Research*, 6(1), pp.1-9 (In Persian).
- 10- López-Moreno, J.I. and Nogués-Bravo, D., 2006. Interpolating local snow depth data: an evaluation of methods. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(10), pp.2217-2232.
- 11- Mahmoudi-Meimand, H., Nazif, S., Ali Abbaspour, R. and Faraji Sabokbar, H., 2016. An algorithm for optimisation of a rain gauge network based on geostatistics and entropy concepts using GIS. *Journal of Spatial Science*, 61(1), pp.233-252 (In Persian).
- 12- Mashal, M., Darvishi, E. and Rahimikhoob, A., 2008. Optimizing the Raingages Networks Using Geostatistical Method Case Study: Khozestan Province. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2 (2), pp. 43-51
- 13- Papamichail, D.M. and Metaxa, I.G., 1996. Geostatistical analysis of spatial variability of rainfall and optimal design of a rain gauge network. *Water resources management*, 10(2), pp.107-127.
- 14- Putthividhya, A. and Tanaka, K., 2012. Optimal rain gauge network design and spatial precipitation mapping based on geostatistical analysis from collocated elevation and humidity data. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(2), p.124.
- 15- Safarrad, T., Farji, S.H., Azizi, G. and Abbaspour, R., 2013. Spatial Analysis of Precipitation Variations in Middle Zagros Using Geo-Statistical Methods (1995-2004) (In Persian).
- 16- Yang, X.S., 2009, October. Firefly algorithms for multimodal optimization. In *International symposium on stochastic algorithms* (pp. 169-178). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 17- Yang, X.S. and He, X., 2013. Firefly algorithm: recent advances and applications. *International Journal of Swarm Intelligence*, 1(1), pp.36-50.
- 18- Yazdani, N.M., Sequerloo, A.Y. and Panahi, M.S., 2013. Reduction of Harmonic in Multilevel Inverters using FA and LAFA ALGORITHMS. In *J. Basic. Appl. Sci. Res.* (Vol. 3, No. 1s, pp. 130-135). TextRoad Publication.