



Improving the method of U-spatial statistics by modeling the enrichment index of stream sediments for the purpose of introducing geochemical anomalous areas of epithermal gold-type mineralization

Mirmahdi Seyedrahimi-Niaraq^{1*}, Neda Shokri², Ali Lotfibakhsh³

1. Faculty of Engineering, University of Mohagheh Ardabili, M.seydrahimi@uma.ac.ir

2. University of Mohagheh Ardabili, neda.sh.526@gmail.com

3. Department of Geology, University of Mohagheh Ardabili

Received: 2022/07/14 - Accepted: 2022/11/08

Abstract

Geochemical halos are regions around mineral deposits where the concentration of elements decreases to a constant level called the background. In the meantime, in order to find out the unusual concentration of elements (anomaly), the upper limit of the background limit (threshold value) must be determined. To achieve this goal, it will be effective and efficient to use new exploration methods. In this article, modeling the data of the element enrichment index with the U-spatial statistic method has been used to draw the potential areas of stream sediments. According to the morphological characteristics of the stream sediments environment, the origin of the samples taken from these sediments goes back upstream of the watersheds, so the analysis of the geochemical data of these samples is different from the rock environments. Preliminary modeling should be done on the data to consider the geological features upstream of the samples. The isotropic nature of the window in which the weighted averaging is performed in the algorithm of the U-spatial statistics method is such that all the upstream and downstream samples participate in this averaging, and this case can be the point considered a significant weakness for this method. First, the element enrichment index was obtained from the raw data to reduce this weakness and improve the method by considering the upstream rock units. Then, the U statistics were modeled on these indices. With this method, while the area indices were more accurately identified, the false potential areas obtained from the U-spatial statistic method were also removed, and the results were acceptable and close to the field realities for determining mineralization potential areas.

Keywords

Enrichment index data modeling, U-spatial statistic method, Geochemical anomaly, Epithermal type gold, Khoshnameh region

* Corresponding Author



1- Introduction

Usually, the processing and interpretation of geochemical data of stream sediments is done in the early stages of the exploration of mineral deposits and on a regional scale. One of the basic issues in this stage is identifying geochemical anomalies and determining areas with mineralization potential. Various methods have been proposed for the univariate and multivariate analysis of geochemical data to determine the threshold value and identify geochemical anomalous areas [1-15]. Univariate methods are divided into three separate groups. The first group is based on the statistical parameters of the distribution (such as the average method plus the multiple of the standard deviation) [16-18]. The second group, which is more complicated than the previous one, considers the frequency distribution of element concentrations (for example, the methods of probability diagram and detachment statistic) [2 and 19]. In the third group, anomalous areas are determined by considering the spatial position of the samples and their spatial relationship with each other [4, 20-25]. In this group, fractal and multi-fractal methods and U-spatial statistics have been widely used to detect anomalous geochemical regions [24, 26-32]. Multivariate statistical methods developed in new developments related to geochemical data analysis, such as principal component analysis (PCA), investigate the relationship between elements and paragenesis related to mineralization [33-36]. Other advanced methods such as the spatially weighted principal component analysis (SWPCA) [30], geochemical mineralization probability index (GMPI) [37 and 38], machine learning algorithm [39-41], transformation Wavelet [42-44] and Geochemical Anomaly Intensity Coefficient Method (GAII) [15] have been used to map geochemical anomalous areas. Also, in the research conducted by Parsa et al., some new developments in univariate and multivariate analysis of geochemical data have been mentioned [45]. The spatial statistics method, as one of the techniques of the structural method, is a moving averaging that changes the dimensions of the window in which the averaging takes position at each specific point, so for each specific point, a number of values for the U-statistic of that point are It is calculated on the points around it [21 and 46]. This causes statistical data analysis without expert judgment, separating subpopulations and detecting anomalous areas. In the previous works that have been done in connection with the U-spatial statistics method, when implementing the algorithm of this method on the raw data of the stream sediments environment, the isotropic nature of the window in which the weighted averaging is performed will cause all upstream and downstream samples to participate in this averaging. While the origin of the samples taken from these sediments goes back to the upstream of the catchment basins, this case can be considered a significant weakness of this method. So, preliminary modeling of the data seems to consider the geological features upstream of the samples. In this research, by performing a preliminary analysis of the raw data and obtaining the element enrichment index for each sample, the algorithm's input was changed to estimated data, ultimately improving the results.

2- Methods and Findings

2-1- Sampling and preparation of samples

215 geochemical samples of stream sediments have been collected in an area of 68.5 km². In order to be moist, all the samples were collected in a volume of more than 4 liters, and after sifting with an 80 mesh sieve in the field camp, in the preparation workshop was sieved under 200 mesh, and 100 grams of each sample was sent to the laboratory [50]. In this research, the gold element was chosen for studies because it has a smaller halo and is one of the active exploration projects. To select other elements among the 44 analyzed elements, the correlation diagram of elements was drawn in the form of a dendrogram through Pearson's method, and finally, six main elements, Au, Sb, As, Bi, Pb, and Cd, were selected for the present study.

2-2- U-spatial Statistics Method

The u-spatial statistics method is a kind of moving average method. This method changes the window's dimensions in which the average is done. Changes in isotropy and anisotropy of variables affect the shape of the window. The distance of the stations around the center of the window is used

to calculate the weight of these stations. These weights are multiplied by the measured values of the stations to finally obtain an estimate for the center point of the window. The average value of the U values denoted by is calculated as follows (Cheng, 1999):

$$(2) \quad U_i(r) = \frac{\sum_{j=1}^{n_1} w_j(r)x_j - \mu}{\sigma} + \frac{\sum_{k=1}^{n_2} w_k(r)x_k - \mu}{\sigma} = \frac{\bar{x}_i(r) - \mu}{\sigma}$$

Where the mean and standard deviation are the total data, \bar{x}_i , and x_j are the values measured at stations j and k inside the window. $w_k(r)$ and $w_j(r)$ are the weights of these stations. $\bar{x}_i(r)$ is the average weight of station i based on the surrounding stations. In this regard, j is for samples with field values, and k is for anomalous values. If the mean of the population is an anomaly, the mean of the background is then $\mu_B < \mu < \mu_A$.

The geochemical map of the potential areas resulting from the U-spatial statistics method for Au and Pb elements is given in Figure (1). First, the data were interpolated by the Kriging estimation method to draw these single-element geochemical maps. On these maps, the anomalous ranges inside the meters with a thick continuous curve and a change in color intensity from blue to green, then red color for higher grades, and also by bringing the threshold value on the map (with U unit), have been specified. These maps have been prepared based on modeled data showing the elements' distribution in the study area. The gold element has a high geochemical concentration in the northeast and center of the region, and its potential areas are located in this zone (Figure 1a). Potential areas of lead element show a perfect correlation with the gold element (Figure 1b).

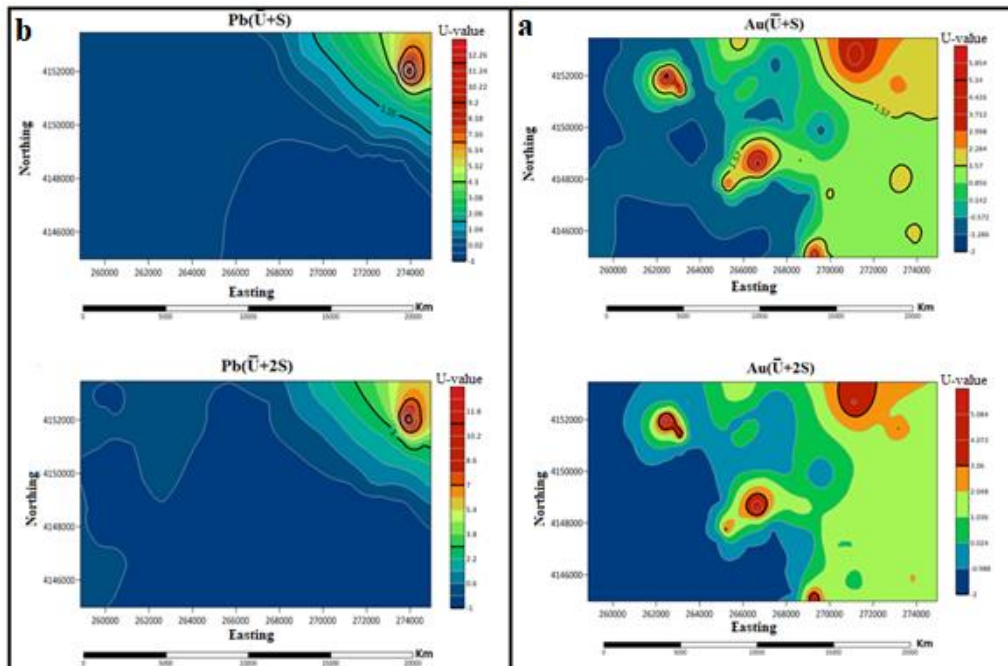


Figure 1. Map of potential areas resulting from U-spatial statistics method for Au (a) and Pb (b) elements using $\bar{U}+SD$ and $\bar{U}+2SD$ criteria

3- Modeling the data of element enrichment factor with the U-statistics method

For detecting and separating anomalies by the U-spatial statistics method, since the averaging window is considered as a circle or an ellipse, in addition to the source rock upstream of the sample, the downstream rocks that have no genetic relationship with the sample were also taken. Therefore, to improve this method, the enrichment index (EI) of 8 elements was used for its implementation. First, the number of samples was determined for the rock units in the area. The geological map was matched with the stream sediments sampling map to remove the synergetic component. By determining the catchment area of each sample (upstream of the sample), all the rock units whose

erosion sediments contributed to the formation of the sample were identified. After separating the statistical subpopulations in each population, the values of each geochemical variable independent of the rock type are normalized. Finally, these estimated data were modeled with the U-spatial statistics algorithm, and anomalous areas were determined. Instead of raw data, this method used an element enrichment index in the code input. In the method of modeling the U-spatial statistic of enrichment index data, the threshold limit of the U-values of the data was calculated using the $\bar{U}+SD$ and $\bar{U}+2SD$ criteria. These threshold values for gold elements were obtained at 1.67 and 3.26, respectively. Table 1 shows the threshold values obtained by this method for the four elements Au, As, Pb, and Sb with the criteria.

Table 3. The results of modeling the data of the enrichment index of stream sediments in the Khoshnameh region with the U-spatial statistics method

Element	$\bar{U}+SD$	$\bar{U}+2SD$
Au	1.67	3.26
As	1.60	3.20
Pb	1.56	3.07
Sb	1.59	3.09

Figure 2 is the single-element geochemical map of the potential areas resulting from modeling enrichment index data using the U-spatial statistics method. $\bar{U}+SD$ and $\bar{U}+2SD$ criteria were used to separate anomaly areas. According to these maps, different anomalous distributions for elements can be recognized. According to Figure (13a), the gold element has a high geochemical concentration in the region's east, northwest, and center, and promising gold areas are located in these areas. The potential areas of As are located in the southern and western parts of the region, and this zone has a high geochemical concentration (Figure 13b).

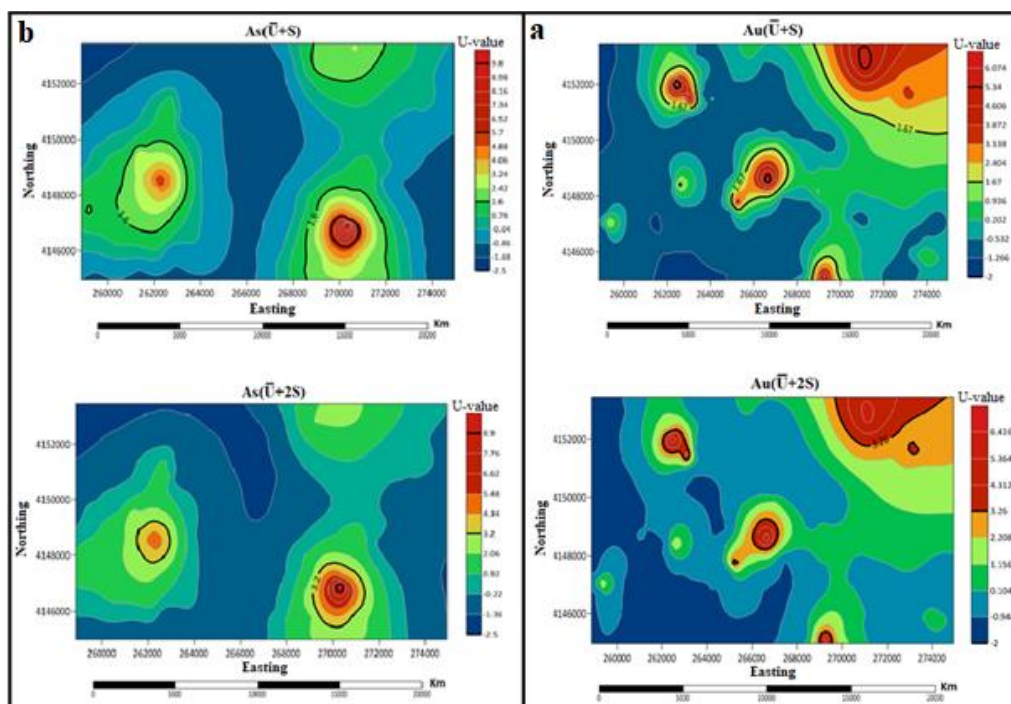


Figure 2. Map of potential areas resulting from the modeling method of U-spatial statistics of enrichment index data for gold (a) and arsenic (b) elements using $\bar{U}+SD$ and $\bar{U}+2SD$ criteria.

4- Validation and efficiency of the U-statistic modeling method of element enrichment index

According to the availability of data related to the gold element, to compare the U-statistics modeling of element enrichment index data and to validate the effectiveness of this method from the field results. For this purpose, the occurrences introduced for the gold element obtained from local and regional explorations were fitted on the anomalous areas obtained by two methods. Figure

(3a) shows the anomalous areas obtained from the U-spatial statistics method. Figure (3b) shows the maps of the anomalous regions obtained from the U-statistics modeling method of the element enrichment index data. In this method, the $\bar{U}+S$ criterion shows the extent of suitable geochemical halos compared to the $\bar{U}+2S$ method. This method has removed various false anomalies obtained in the southeast of the region. It seems that the reason for improving the results is considering the upstream geological features of the stream sediment samples in the method. The U-statistics modeling method shows the data of element enrichment index such as the U-spatial statistics method, an anomaly with high intensity in the center of the region, which was discovered by local and regional explorations. It seems that this area needs more exploratory studies. Finally, the results of $\bar{U}+S$ in both methods are more consistent with field realities, and it seems this criterion is the best for separating anomalous areas. Also, considering that some false anomalies have been removed in the final map related to modeling the enrichment index data using the U-spatial statistic method, it seems that the positive effects of the element enrichment index have improved the U-spatial statistic method. This new integrated method is more reliable than the U-statistics method.

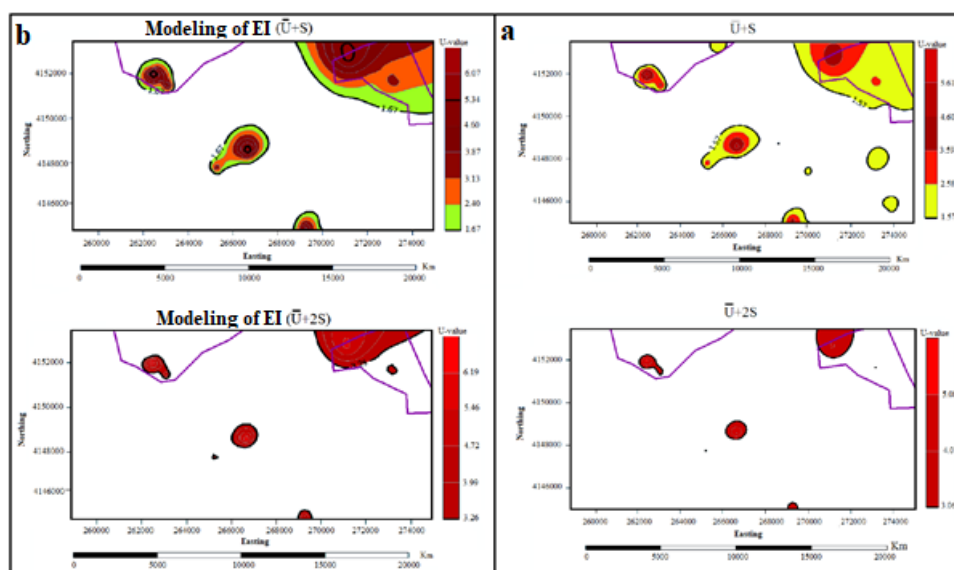


Figure 15. Anomalous geochemical regions obtained from a) the U-spatial statistics method; b) Modeling the element enrichment index data by the U-spatial statistics method

5- Conclusions

A new integrated method based on the element enrichment index and the algorithm of the U-spatial statistics method was developed in this research. The results obtained are as follows:

- According to the results obtained from the cluster analysis, the elements lead, arsenic, antimony, barium, molybdenum, tin, and potassium show a positive correlation with the investigated element gold.
- According to the maps prepared through the U-spatial statistics method, the gold element has a high geochemical concentration in the northeast and center of the region.
- The maps prepared by modeling the data of the enrichment index of the elements by the U-statistics modeling method show the high geochemical concentration of the gold element in the northeast, northwest, and center of the study area. In general, similar results have been obtained by the two methods. Still, according to the capabilities of the element enrichment index in the new integrated method, it seems that it, taking into account the upstream samples collected from stream sediments and the secondary effects of the catchment basin on the samples, provides us with more reliable results. The new method introduced both area occurrences with the $\bar{U}+S$ criterion, removed the false anomaly obtained from the U-spatial statistic method, and improved

the results of this method. Therefore, it is suggested that for modeling the exploratory data of stream sediments, a preliminary analysis should be performed to obtain the element enrichment index before applying geochemical structural methods to the raw data.

- Both methods, in addition to the two gold occurrences obtained from regional explorations, also showed a significant index in the center of the region, and it seems that more exploration studies should be carried out in this area.

References

1. Sinclair, A.J., 1974. Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. *Journal of Geochemical Exploration*, 3(2), pp.129-149.
2. Sinclair, A.J., 1991. A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited. *Journal of Geochemical Exploration*, 41(1-2), pp.1-22.
3. Yusta, I., Velasco, F. and Herrero, J.-M., (1998), Anomaly threshold estimation and data normalization using EDA statistics: application to lithochemical exploration in Lower Cretaceous Zn–Pb carbonate-hosted deposits, northern Spain. *Applied geochemistry*, 13: 421-439.
4. Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from the background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51, 109–130.
5. Cheng, Q., (1999), Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration*, 65: 175-194.
6. Cheng, Q., Xu, Y. and Grunsky, E., 2000, Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research*, 9: 43-52.
7. Gonçalves, M.A., Mateus, A. and Oliveira, V., 2001, Geochemical anomaly separation by multifractal modelling. *Journal of Geochemical Exploration*, 72: 91-114.
8. Li, C., Ma, T. and Shi, J., (2003), Application of a fractal method relating concentrations and distances for separating geochemical anomalies from background. *Journal of Geochemical Exploration*, 77: 167-175.
9. Lima, A., De Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M. and Albanese, S., 2003, Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: an application on regional stream sediments of (Italy), Campania region. *Applied geochemistry*, 18: 1853-1865.
10. Zuo, R., Cheng, Q. and Xia, Q., (2009), Application of fractal models to the characterization of the vertical distribution of geochemical element concentration. *Journal of Geochemical Exploration*, 102: 37-43.
11. Ghannadpour, S.S. and Hezarkhani, A., (2016), Introducing 3D U-statistic method for separating anomaly from background in exploration geochemical data with associated software development. *Journal of Earth System Science*, 125: 387-401.
12. Ghezelbash, R. and Maghsoudi, A., 2018, Comparison of U-spatial statistics and C–A fractal models for delineating anomaly patterns of porphyry-type Cu geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. *Comptes Rendus Geoscience*, 350: 180-191.
13. Liu, Y., Cheng, Q., Carranza, E.J.M. and Zhou, K., 2019, Assessment of geochemical anomaly uncertainty through geostatistical simulation and singularity analysis. *Natural Resources Research*, 28: 199-212.
14. Yousefi, M., Kreuzer, O.P., Nykänen, V. and Hronsky, J.M., (2019), Exploration information systems-a proposal for the future use of GIS in mineral exploration targeting. *Ore Geology*

Reviews: 103005.

15. Seyedrahimi-Niaraq, M. and Mahdiyanfar, H., 2021. Introducing a new approach of geochemical anomaly intensity index (GAI) for increasing the probability of exploration of shear zone gold mineralization. *Geochemistry*, 81(4), p.125830.
16. Govett, G., Goodfellow, W., Chapman, R. and Chork, C., 1975, Exploration geochemistry—distribution of elements and recognition of anomalies. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 7: 415-446.
17. Mandelbrot, B.B., Pignoni, R., 1983, *The fractal geometry of nature*, WH freeman, New York. vol 173.
18. Solovov, A.P., 1985, *Geochemical prospecting for mineral deposits*. Mir Publisher.
19. Stanley, C.R. and Sinclair, A.J., 1989, Comparison of Probability Plots and the Gap statistic in selection of Threshold of Exploration Geochemistry Data. *Journal of Geochemical Exploration*. 32:355-357.
20. Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A. and Good, D., 1996, Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba. *Computers & Geosciences*, 22:497–507.
21. Cheng, Q., Agterberg, F. and Bonham-Carter, G., 1996, A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical exploration*, 56: 183-195.
22. Lin, Y.P., 2002, Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals. *Environmental Geology*, 42:1–10.
23. Rantitsch, G., 2004, Geochemical exploration in a mountainous area by statistical modeling of polypopulational data distributions. *Journal of Geochemical Exploration*, 82: 79-95.
24. Afzal, P., Alghalandis, Y.F., Khakzad, A., Moarefvand, P., Omran, N.R., 2011, Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *Journal of Geochemical exploration*, 108: 220–232.
25. Cheng, Q., Xia, Q., Li, W., Zhang, S., Chen, Z., Zuo, R. and Wang, W., 2010, Density/area power-law models for separating multi-scale anomalies of ore and toxic elements in stream sediments in Gejiu mineral district, Yunnan Province, China. *Biogeosciences*, 7:3019–3025.
26. Cheng, Q., Bonham-Carter, G., Wang, W., Zhang, S., Li, W. and Qinglin, X. 2011, A spatially weighted principal component analysis for multielement geochemical data for mapping locations of felsic intrusions in the Gejiu mineral district of Yunnan, China. *Computers & Geosciences*, 37: 662–669.
27. Carranza, E.J.M., Zuo, R. and Cheng, Q., 2012. Fractal/multifractal modelling of geochemical exploration data. *Journal of Geochemical Exploration*, 122, pp.1-3.
28. Yousefi, M. and Carranza, E.J.M., 2015, Prediction–area (P–A) plot and C–A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling. *Computers & Geosciences*, 79: 69-81.
29. Zuo, R., 2017. Machine learning of mineralization-related geochemical anomalies: A review of potential methods. *Natural Resources Research*, 26(4), pp.457-464.
30. Wang, Z., Zuo, R. and Dong, Y., 2019. Mapping geochemical anomalies through integrating random forest and metric learning methods. *Natural Resources Research*, 28(4), pp.1285-1298.
31. Ziaii, M., Safaria, S., Timkinb, T., Voroshilovb, Va. and Yakichb, T., 2019, Identification of geochemical anomalies of the porphyry–Cu deposits using concentration gradient modelling: A case study, Jebal-Barez area, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 199:16-30.
32. Grunsky, E.C. and de Caritat, P., 2020. State-of-the-art analysis of geochemical data for

- mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(2), pp.217-232.
33. Muller, J., Kylander, M., Martinez-Cortizas, A., Wüst, R.A., Weiss, D., Blake, K., et al., 2008. The use of principle component analyses in characterising trace and major elemental distribution in a 55kyr peat deposit in tropical Australia: implications to paleoclimate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (2), 449–463.
 34. Vicente, V.A., Pratas, J.A., Santos, F.C., Silva, M.M., Favas, P.J. and Conde, L.E., 2021. Geochemical anomalies from a survey of stream sediments in the Maquelab area (Oecusse, Timor-Leste) and their bearing on the identification of mafic-ultramafic chromite rich complex. *Applied Geochemistry*, 126, p.104868.
 35. Grunsky, E.C., Drew, L.J., Sutphin, D.M., 2009. Process recognition in multi-element soil and stream-sediment geochemical data. *Applied Geochemistry*, 24, 1602–1616
 36. Chandrajith, R., Dissanayake, C.B., Tobschall, H.J., 2001. Application of multi-element relationships in stream sediments to mineral exploration: a case study of Walawe Ganga Basin, Sri Lanka. *Applied Geochemistry* 16, 339–350.
 37. Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., Carranza, E. J. M., 2012. Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 115, 24-35.
 38. Helba, H.A., El-Makky, A.M. and Khalil, K.I., 2021. Application of CN fractal model, factor analysis, and geochemical mineralization probability index (GMPI) for delineating geochemical anomalies related to Mn-Fe deposit and associated Cu mineralization in west-central Sinai, Egypt. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*.
 39. Gonbadi, A.M., Tabatabaei, S.H., Carranza, E.J.M., 2015. Supervised geochemical anomaly detection by pattern recognition. *J. Geochem. Explor.* 157, 81–91.
 40. Zhang, C., Zuo, R. and Xiong, Y., 2021. Detection of the multivariate geochemical anomalies associated with mineralization using a deep convolutional neural network and a pixel-pair feature method—*Applied Geochemistry*, 130, p.104994.
 41. Luo, Z., Zuo, R., Xiong, Y. and Wang, X., 2021. Detection of geochemical anomalies related to mineralization using the GANomaly network. *Applied Geochemistry*, p.105043.
 42. Zhang, L., Bai, G., Xu, Y., 2003. A wavelet-analysis-based new approach for interference elimination in geochemical hydrocarbon exploration. *Math. Geol.* 35 (8), 939–952
 43. Shahi, H., Ghavami, R., Rouhani, A.K., Kahoo, A.R. and Haroni, H.A., 2015. Application of Fourier and wavelet approaches for identification of geochemical anomalies. *Journal of African Earth Sciences*, 106, pp.118-128.
 44. Pourgholam, M.M., Afzal, P., Yasrebi, A.B., Gholinejad, M. and Wetherelt, A., 2021. Detection of geochemical anomalies using a fractal-wavelet model in Ipack area, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 220, p.106675.
 45. Parsa, M., Sadeghi, M. and Grunsky, E., 2022. Innovative methods applied to processing and interpreting geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*, p.106983.
 46. Seyedrahimi-Niaraq, M. and Hekmatnejad, A., 2021. The efficiency and accuracy of probability diagram, spatial statistic and fractal methods in the identification of shear zone gold mineralization: a case study of the Saqqez gold ore district, NW Iran. *Acta Geochimica*, 40(1), pp.78-88.
 47. Development of earth sciences Co., 2013, systematic geochemical discoveries in Hashtjin: 1:100,000 sheet, 2013, report of Ardabil province SAMT organization.

-
48. Afzal, P., Asl, R.A., Adib, A. and Yasrebi, A.B., 2015. Application of fractal modelling for Cu mineralisation reconnaissance by ASTER multispectral and stream sediment data in Khoshname area, NW Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43(1), pp.121-132.
 49. Organization of Geology and Mineral Exploration, 2015, report on the status of gold exploration in Iran.
 50. Zarnab Exploration Consulting Engineers Co., 1385, exploration of polymetal elements (gold and other elements) in the area of Khushnameh Hashtjin village, 1382, report of Ardabil Province SAMT Organization.



مقاله پژوهشی

بهبود روش آماره فضایی U با مدل سازی شاخص غنی شدگی عناصر رسوبات آبراهه‌ای به هدف معرفی مناطق آنومال ژئوشیمیایی کانی سازی تیپ طلای اپی ترمال

میرمهدی سیدرحیمی نیارق^{۱*}، ندا شکری^۲، علی لطفی بخش^۳

۱. استادیار دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی، m.seyedrahimi@uma.ac.ir
۲. کارشناس ارشد زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه محقق اردبیلی، neda.sh.526@gmail.com
۳. استادیار دانشگاه محقق اردبیلی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، Lotfibakhsh@uma.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

چکیده

هاله‌های ژئوشیمیایی مناطقی در اطراف ذخایر معدنی اند که در آن غلظت عناصر تا حد ثابتی به نام زمینه کاهش می‌یابد. در این میان برای پی بردن به غلظت غیرعادی عناصر یعنی آنومالی باید حد فوقانی مقدار زمینه یعنی حدآستانه‌ای تعیین شود. برای رسیدن به این هدف استفاده از روش‌های نوین و جدید اکتشافی موثر و کارآمد است. در این مقاله برای ترسیم مناطق پتانسیل‌دار رسوبات آبراهه‌ای از روش مدل سازی داده‌های شاخص غنی شدگی عناصر با روش آماره فضایی U استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های مورفولوژی محیط رسوبات آبراهه‌ای، منشأ نمونه‌های برداشت شده از این رسوبات به بالادست حوضه‌های آبریز برمی‌گردد، بنابراین تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی این نمونه‌ها با محیط‌های سنگی از این لحاظ متفاوت است و باید یک مدل سازی اولیه بر روی داده‌ها برای در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین شناسی بالادست نمونه‌ها انجام گیرد. ماهیت همسانگردی پنجره‌ای که میانگین گیری وزنی در الگوریتم روش آماره فضایی U انجام می‌شود، طوری است که تمامی نمونه‌های بالاست و پایین دست نمونه‌ها در این میانگین گیری سهیم‌اند و این مورد می‌تواند نقطه ضعف قابل توجهی برای این روش به شمار آید. برای کاهش این ضعف و در جهت بهبود روش، ابتدا با در نظر گرفتن واحدهای سنگی بالادست، بر روی داده‌های خام، شاخص غنی شدگی عناصر بدست آمد و سپس مدل سازی آماره U بر روی این شاخص‌ها انجام شد. با این روش، ضمن اینکه اندیس‌های منطقه با دقت بیشتری شناسایی شدند، مناطق پتانسیل‌دار کاذب بدست آمده از روش آماره فضایی U نیز حذف شده و نتایج قابل قبول و نزدیک به واقعیت‌های میدانی برای تعیین مناطق پتانسیل‌دار کانی سازی نمایان شد.

کلمات کلیدی

مدل سازی داده‌های شاخص غنی شدگی، روش آماره فضایی U، آنومالی ژئوشیمیایی، طلای اپی ترمال، منطقه خوشنامه



۱- مقدمه

خاص ابعاد پنجره‌ای که در آن میانگین‌گیری انجام می‌گیرد، تغییر داده می‌شود، بنابراین برای هر نقطه خاص تعدادی از مقادیر برای آماره U آن نقطه از روی نقاط اطراف آن محاسبه می‌شود [۲۱ و ۴۶]. همین امر موجب می‌شود بدون قضاوت کارشناسی به تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها پرداخت و جداسازی زیرجوامع و تشخیص مناطق آنومال را انجام داد. در کارهای قبلی که در ارتباط با روش آماره فضایی U انجام شده است، در هنگام پیاده‌سازی الگوریتم این روش بر روی داده‌های خام محیط رسوبات آبراهه‌ای، ماهیت همسانگردی پنجره‌ای که میانگین‌گیری وزنی در داخل آن انجام می‌شود، باعث می‌شود که تمامی نمونه‌های بالاست و پایین‌دست نمونه‌ها در این میانگین‌گیری سهیم شوند. در حالی که منشا نمونه‌های برداشت شده از این رسوبات به بالادست حوضه‌های آبریز برمی‌گردد، بنابراین این مورد می‌تواند نقطه ضعف قابل توجهی برای این روش به شمار آید و به نظر می‌رسد یک مدل‌سازی اولیه بر روی داده‌ها برای در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین‌شناسی بالادست نمونه‌ها انجام گیرد. در این پژوهش، با انجام تحلیل اولیه بر روی داده‌های خام و بدست آوردن شاخص غنی‌شدگی عناصر برای هر نمونه، با توجه به واحدهای سنگی بالادست نمونه، ورودی الگوریتم به داده‌های تخمینی تغییر پیدا کرد و در نهایت باعث بهبود نتایج روش آماره فضایی U شد.

۲- محدوده جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در استان اردبیل، ۲۰ کیلومتری جنوب غرب خلخال و ۱۵ کیلومتری شمال شمال شرق هشتجین با مختصات جغرافیایی $48^{\circ} 16' 22.0''$ و $48^{\circ} 27' 18.0''$ شرقی و $37^{\circ} 30' 00.0''$ و $37^{\circ} 25' 24.0''$ شمالی واقع شده است. از نظر آب و هوایی سرد و کوهستانی است و از طریق جاده اصلی خلخال- گلوچه- هشتجین از سمت شمال شرق و جاده آسفالت خلخال- فیروزآباد- هشتجین از سمت شمال غرب می‌توان به این منطقه دسترسی پیدا کرد (شکل ۱).

از لحاظ زمین‌شناسی ایران، طبق تقسیمات ساختمانی ایران محدوده خوشنامه در زون البرز- آذربایجان واقع شده و تحت تاثیر دو فاز تکتونیکی کمربند چین‌خورده و رورانده البرز غربی و همچنین مجموعه ماگمایی البرز است. فشارهای تکتونیکی ناشی از روراندگی شمال شرق- جنوب غرب باعث تغییر شکل واحدها شده است. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (شکل ۲) حاکی از تنوع وسیع واحدهای سنگی در این منطقه است [۴۷].

به طور معمول پردازش و تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌های در مراحل اولیه اکتشاف ذخایر معدنی و در مقیاس ناحیه‌ای انجام می‌گیرد. یکی از موضوعات اساسی در این مرحله از اکتشافات ژئوشیمیایی، شناسایی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی و تعیین مناطق با پتانسیل کانی‌سازی است. روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل تک‌متغیره و چندمتغیره داده‌های ژئوشیمیایی به منظور تعیین مقدار حدآستانه‌ای و مشخص کردن مناطق آنومال ژئوشیمیایی پیشنهاد شده است [۱۵-۱].

روش‌های تک‌متغیره به سه گروه مجزا تقسیم‌بندی می‌شوند. اولین گروه بر اساس پارامترهای آماری توزیع (مانند روش میانگین به علاوه چند برابر انحراف معیار) بنا نهاده شده‌اند [۱۸-۱۶]. دومین گروه که پیچیده‌تر از قبلی است، توزیع فراوانی غلظت عناصر را در نظر می‌گیرد (برای مثال روش‌های نمودار احتمال و آماره انفعال) [۲ و ۱۹]. در سومین گروه، با در نظر گرفتن موقعیت فضایی نمونه‌ها و ارتباط فضایی آن‌ها نسبت به یکدیگر، مناطق آنومال تعیین می‌شود [۴]، و [۲۰-۲۵]. در این گروه روش‌های فرکتال، مولتی‌فرکتال و آمار فضایی U به طور گسترده برای تشخیص مناطق آنومال ژئوشیمیایی استفاده شده‌اند [۲۴ و ۲۶-۳۲]. روش‌های آماری چندمتغیره که در پیشرفت‌های جدید مرتبط با آنالیز داده‌های ژئوشیمیایی توسعه داده شده‌اند مانند روش تحلیل مولفه‌های اصلی^۱ ارتباط بین عناصر و پارامترهای مرتبط با کانی‌سازی را بررسی می‌کنند [۳۶-۳۳]. روش‌های پیشرفته دیگری مانند روش تحلیل مولفه‌های اصلی وزن‌دار فضایی^۲ [۳۰]، شاخص احتمال کانی‌سازی ژئوشیمیایی^۳ [۳۷ و ۳۸]، الگوریتم یادگیری ماشین^۴ [۴۱-۳۹]، تبدیل موجک [۴۴-۴۲] و روش ضریب شدت آنومالی ژئوشیمیایی^۵ [۱۵] با هدف نقشه‌درآوردن مناطق آنومال ژئوشیمیایی به کار برده شده‌اند. همچنین در تحقیقی که پارسا و همکاران در این خصوص انجام داده‌اند به برخی از پیشرفت‌های نوین در تجزیه و تحلیل تک‌متغیره و چندمتغیره داده‌های ژئوشیمیایی اشاره شده است [۴۵].

روش آماره فضایی به عنوان یکی از تکنیک‌های روش ساختاری، نوعی میانگین‌گیری متحرک است که در هر نقطه

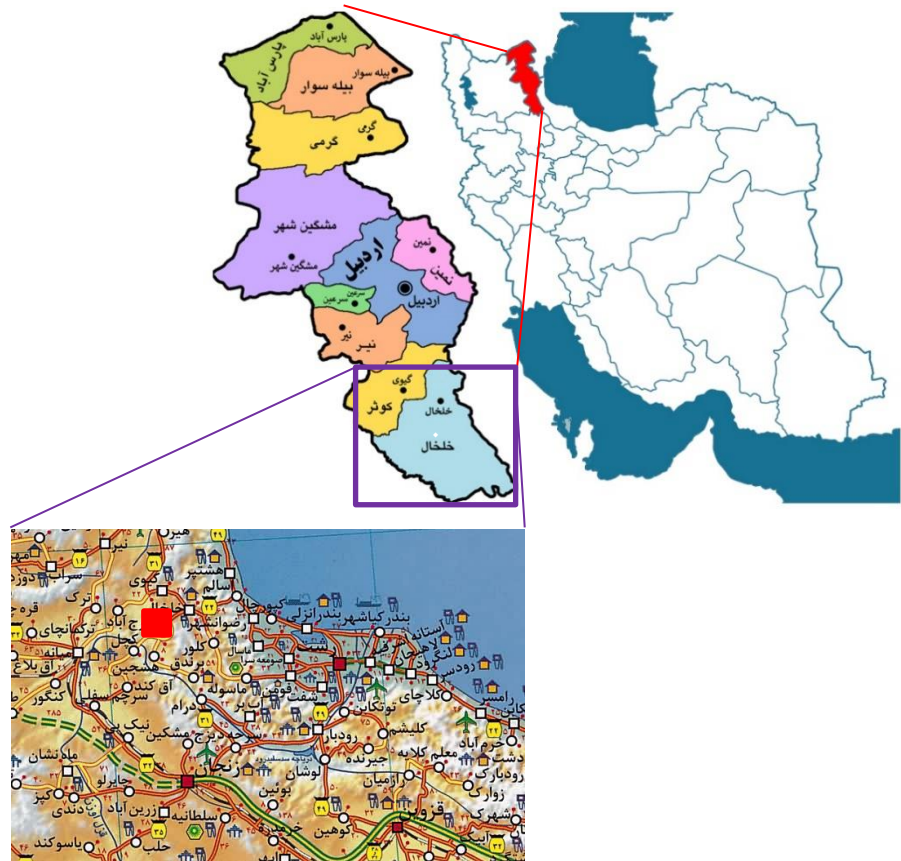
¹ Principal Component Analysis (PCA)

² Spatially Weighted Principal Component Analysis (SWPCA)

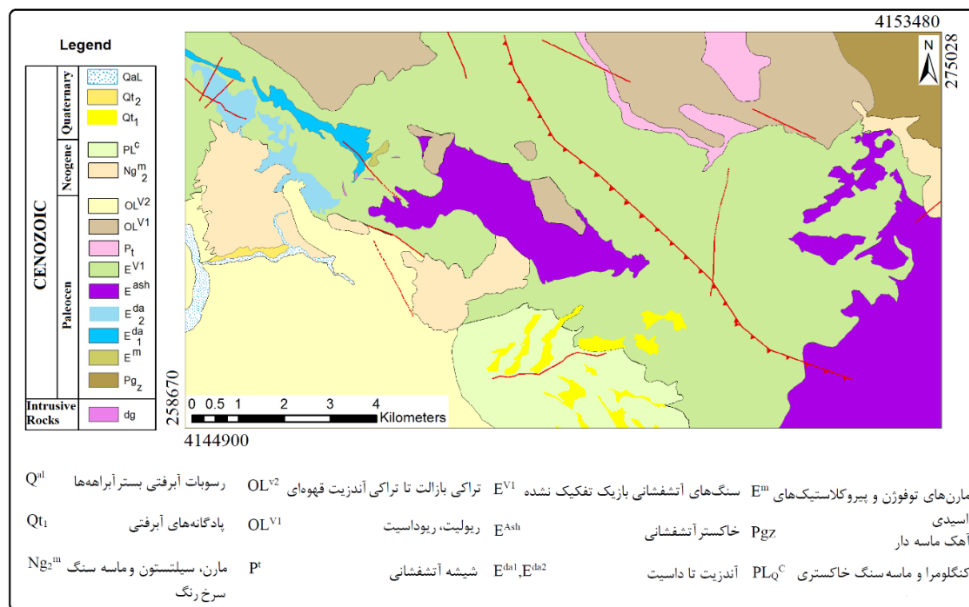
³ Geochemical Mineralization Probability Index (GMPI)

⁴ Machine learning algorithms

⁵ Geochemical Anomaly Intensity Index (GAII)



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (مربع قرمز) و راه‌های دسترسی آن

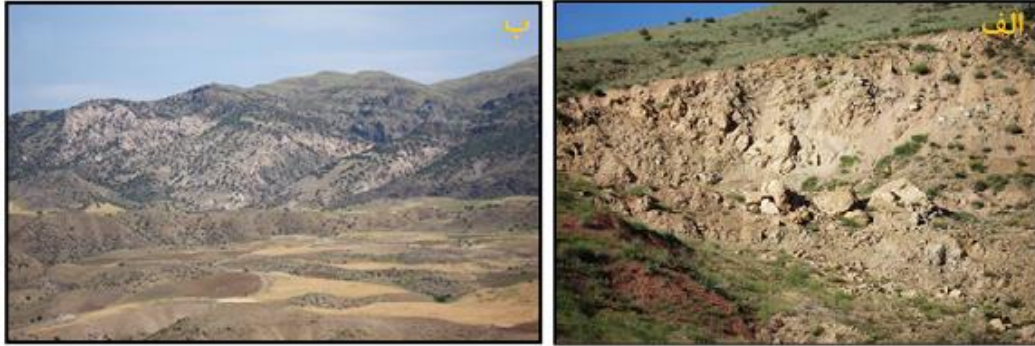


شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده خوشنامه بر روی ورقه هشتجین [۵۰]

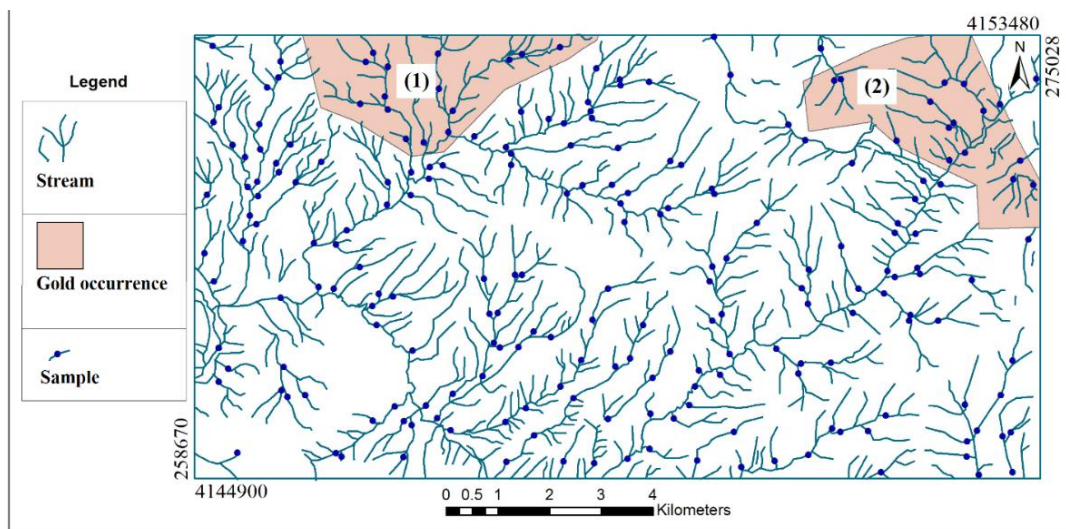
گرفته است. واحدهای آتشفشانی آندزیتی تا داسیتی E^{da1}, E^{da2} به صورت لایه‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط در قسمت شمال غربی منطقه و در اطراف تاقدیس قرار دارند، شیب این لایه‌ها در دو سوی تاقدیس متفاوت است. از نظر مشخصات میدانی، این واحد دارای رنگ اولیه بنفش تا صورتی کم رنگ است که در اثر

قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه سنگ آهک ماسه‌دار (Pg_z) پالئوسن و از نوع سنگ‌های کربناته خالص است و به صورت گسل تراستی در مجاورت واحدهای جوانتر قرار گرفته است (شکل ۳- الف). واحد مارن توفوزن و پیروکلاست‌های اسیدی (E^m) در دره خوشنامه در داخل واحد سنگ‌های ولکانیکی تفریق نیافته قرار

دگرسانی کاتولینیتی و سیلیسی از شیری به سفید تغییر کرده است (شکل ۳-ب) [۴۷].



شکل ۳-الف- نمایی از رخنمون واحد سنگ آهک ماسه‌دار (PgZ) در شمال شرق بیرق، دید به سوی شمال؛ ب- نمایی از رخنمون واحد آتشفشانی آندزیتی تا داسیتی (E^{da1}) در شمال روستای مزرعه، دید به سوی شمال غرب [۴۷]



شکل ۴- نقشه مربوط به آبراهه‌های منطقه و موقعیت نمونه‌ها و اندیس‌های کشف شده حاصل از عملیات اکتشافات ناحیه‌ای و محلی

کمپلکس‌های کلر در محلول حل می‌شوند. ضمن بالا آمدن محلول به دلیل کاهش فشار ایستایی، به تدریج گازهای HCl, H_2S, CO_2 شروع به ظاهر شدن در محلول می‌کنند. عمقی که گازها شروع به ظاهر شدن می‌کنند تابع غلظت گازها و مقدار املاح محلول است. ظهور گازهای H_2S, CO_2 موجب افزایش PH محلول و در نتیجه باعث ناپایداری کمپلکس‌های کلر شده و سرب، روی و نقره به صورت سولفید برجای گذاشته می‌شوند [۴۹].

نتایج مطالعات انجام شده در منطقه منجر به کشف دو اندیس طلا شده است. شکل ۴ نقشه موقعیت اندیس‌های طلا بر روی آبراهه‌های منطقه را نشان می‌دهد. برای صحت‌سنجی نتایج و بررسی کارایی روش توسعه داده شده در این پژوهش از موقعیت این دو اندیس نیز استفاده شده است. محدوده شماره ۱ به نام خوشنامه، در بخش شمال غربی منطقه واقع شده است و محدوده شماره ۲ نیز بیرق نام دارد که در قسمت شمال شرقی منطقه قرار دارد.

در مورد تیپ کانی‌سازی، بررسی‌های صحرایی منطقه هشتمین نشان از تیپ کانی سازی طلا از نوع اپی‌ترمال با اولویت کانی‌سازی پلی‌متال را دارد [۴۷ و ۴۸]. برای تشکیل این نوع کانی‌سازی‌ها آب‌های سطحی از طریق گسل‌ها و شکستگی‌های واقع در مناطق آتشفشانی به طرف پایین به حرکت در آمده، تحت تاثیر حرارت آزاد شده از سنگ‌های منطقه تشکیل چرخه آبگرم را خواهند داد. ترکیب شیمیایی آبگرم ارتباط مستقیم با ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌های منطقه، میزان تخلخل، شکستگی و درجه حرارت محلول را خواهند داشت. تحقیقات هنلی^۱ نشان می‌دهد که طلا در محلول‌های گرمابی در حرارت پایین بیشتر به صورت کمپلکس‌های بی‌سولفید حمل می‌شود و کمپلکس‌های کلر نقش مهمی در انتقال طلا ندارند. آرسنیک، جیوه و آنتیموان در محلول‌های اپی‌ترمال بیشتر به صورت کمپلکس‌های بی‌سولفید حمل شده است اما نقره، سرب و روی بیشتر به صورت

¹ Henly

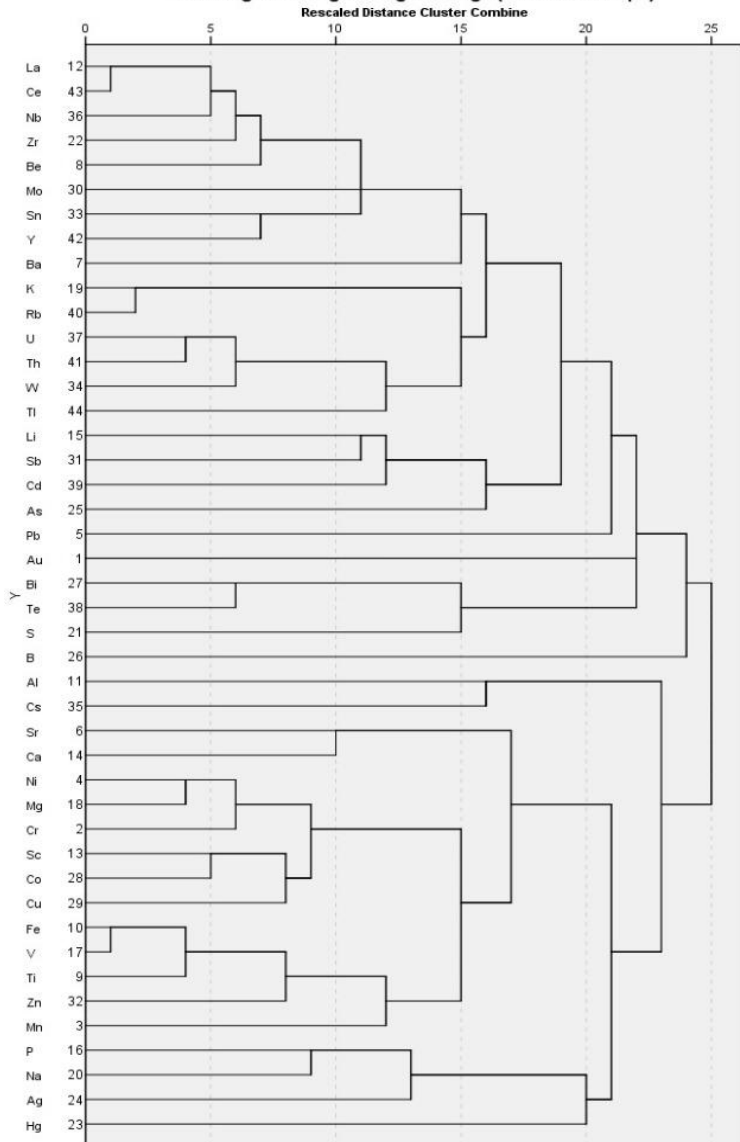
۳- آماده سازی داده‌ها و روش‌ها

۳-۱- نمونه برداری و آنالیز داده‌ها

تعداد ۲۱۵ نمونه ژئوشیمیایی از رسوبات آبراهه‌ای در منطقه‌ای به وسعت ۶۸/۵ کیلومتر مربع جمع‌آوری شد. برای مرطوب بودن، تمامی نمونه‌ها در حجمی بالغ بر ۴ لیتر (با توجه به دانه‌بندی) برداشت شد و پس از سرند کردن با الک ۸۰ مش در کمپ صحرائی، در کارگاه آماده‌سازی زیر ۲۰۰ مش الک شده و ۱۰۰ گرم از هر نمونه به آزمایشگاه ارسال شد. فلزات پایه و عناصر اصلی بر پایه انحلال در چهار اسید با دستگاه ICP-MS و طلا به روش قال‌گذاری^۱ آنالیز شد [۵۰]. در این پژوهش، عنصر طلا به دلیل اینکه هاله کوچکتری دارد و از پروژه‌های فعال در اکتشاف است برای انجام مطالعات انتخاب شد. برای انتخاب عناصر دیگر از میان ۴۴ عنصر آنالیز شده، نمودار همبستگی عناصر در قالب یک دندوگرام از طریق روش پیرسون رسم شد که نتایج آن در شکل ۵ آورده شده است. طبق این نمودار عناصر به دو گروه تقسیم شدند، گروهی که شامل عناصر Au، Sb، Bi، Pb، Cd است، در مقابل گروه Mn، Hg، P، Na، Ag، Zn قرار دارد. بر اساس نمودار همبستگی عناصر، ابتدا گروه حاوی طلا با بیش از ۲۰ عنصر، برای پیاده‌سازی روش‌ها انتخاب شد. برای بررسی بیشتر و محدود کردن عناصر به شش مورد، نوع تیپ کانی‌سازی طلا نیز در نظر گرفته شد. بررسی‌های صحرائی در منطقه هشتجین نشان از تیپ کانی‌سازی طلا از نوع ایپی‌ترمال با اولویت کانی‌سازی پلی‌متال را دارد. بنابراین با در نظر گرفتن تیپ کانی‌سازی در منطقه نیز در نهایت شش عنصر اصلی Au، Sb، Bi، Pb، Cd برای این پژوهش انتخاب شد.

مطالعات اولیه روی داده‌ها نشان از وجود یک مقدار خارج از ردیف در مقادیر عنصر Pb دارد که شناسایی و پس از اصلاح جایگزین شد (شکل ۶). با مطالعه داده‌های عنصر طلا، هیچ داده خارج از ردیفی برای این عنصر تشخیص داده نشد. از آنجا که محل دو اندیس معرفی شده طی اکتشافات ناحیه‌ای و محلی شناسایی شده است، بنابراین این مناطق برای اعتبارسنجی نتایج در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)



شکل ۵- دندوگرام حاصل از آنالیز خوشه‌ای مربوط به داده‌های خام منطقه مورد مطالعه

۳-۲- روش آماره فضایی U

روش آمار فضایی U^۲ نوعی روش میانگین‌گیری متحرک است با این ویژگی که در هر نقطه خاص ابعاد پنجره‌ای که در داخل آن میانگین‌گیری انجام می‌گیرد، تغییر داده می‌شود. بنابراین، برای هر نقطه خاص، چندین مقدار برای آماره U آن نقطه از روی نقاط اطراف آن محاسبه می‌شود، بدین ترتیب ارتباط فضایی نمونه‌ها کاملاً در نظر گرفته می‌شود. تغییرات ایزوتروپی و آنیزوتروپی متغیرها در شکل پنجره‌ها موثر است. فاصله بین ایستگاه‌های اطراف مرکز پنجره برای محاسبه وزن این ایستگاه‌ها استفاده می‌شود، این وزن‌ها در مقادیر اندازه‌گیری شده ایستگاه‌ها ضرب شده تا در نهایت تخمینی برای نقطه مرکزی پنجره به دست آید. مقدار متوسط مقادیر U که با $U_i(r)$ نشان داده می‌شود از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۴۶]:

² U-spatial statistics method

¹ Fire ASSAY

$$U_i(r) = \frac{\sum_{j=1}^{n_1} W_j(r) X_j - \mu}{\sigma} + \frac{\sum_{k=1}^{n_2} W_k(r) X_k - \mu}{\sigma} = \frac{\bar{X}_i(r) - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

که در آن: $\bar{X}_i(r)$: میانگین وزنی ایستگاه i بر اساس مقادیر ایستگاه‌های اطراف

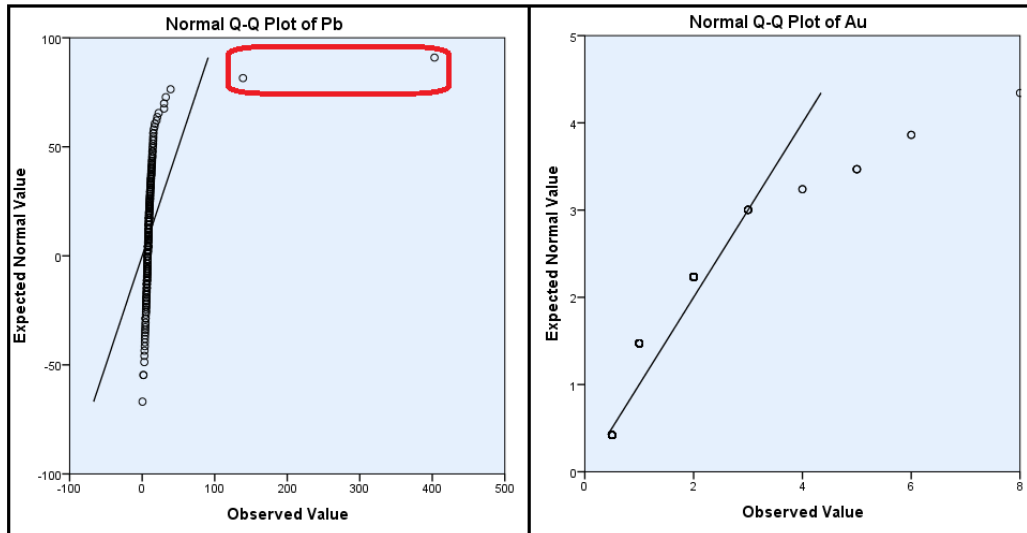
j و k : به ترتیب مربوط به نمونه‌هایی با مقادیر زمینه و مقادیر آنومالی‌اند.

σ : انحراف معیار کل داده‌ها

اگر μ_A : میانگین جامعه آنومالی و μ_B : میانگین جامعه زمینه باشد، آنگاه رابطه $\mu_B < \mu < \mu_A$ برقرار است.

X_j و X_k : مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های j و k در داخل پنجره

$W_j(r)$ و $W_k(r)$: وزن‌های ایستگاه‌ها



شکل ۶- نمودار Q-Q Plot عناصر Pb و Au؛ دو مقدار خارج از ردیف عنصر Pb داخل کادر قرمز مشخص شده است

برای تمامی نمونه‌ها مستقل از تیپ سنگی حاصل می‌شود. در نهایت این داده‌های تخمینی با الگوریتم روش آماره فضایی U مدل‌سازی و مناطق آنومال تعیین شد.

۳-۴- طبقه‌بندی نمونه‌ها بر اساس نوع واحدهای سنگی بالادست منطقه مورد مطالعه

برای کاهش تعداد جوامع آماری، واحدهای سنگی مشابه که از نظر ژئوشیمیایی دارای ترکیب نسبتاً مشابهی‌اند، به عنوان یک جامعه سنگی در نظر گرفته شد. اختصارات و انواع سنگ‌های بالادست بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰۰ در جدول ۱ خلاصه شده است. بر این اساس، برای زیرجوامع تک سنگی، دو سنگی و سه سنگی به ترتیب ۷۷ نمونه (شامل هفت تیپ تک سنگی مختلف)، ۶۳ نمونه (شامل سیزده تیپ مجموعه دو سنگی) و ۳۹ نمونه (شامل یازده تیپ مجموعه سه سنگی) طبقه‌بندی شد. زیرجامعه بیش از سه سنگی نیز به طور مستقل ۳۶ نمونه در نظر گرفته شد. برای تعیین شاخص غنی‌شدگی، هر جامعه از نمونه (نمونه‌های طبقه‌بندی شده بر طبق سنگ بالادست) باید دارای حداقل تعداد نمونه لازم یعنی ۱۰ نمونه باشد، سپس با استفاده از تقسیم مقادیر هر عنصر

۳-۳- مدل‌سازی داده‌های شاخص غنی‌شدگی عناصر با روش آماره فضایی U

در تشخیص و جداسازی آنومالی از طریق روش آماره فضایی U، از آنجا که پنجره میانگین‌گیری به صورت دایره یا بیضی در نظر گرفته می‌شود، بنابراین علاوه بر سنگ منشا بالادست نمونه برداشت شده، سنگ‌های پایین‌دست هم که هیچ‌گونه ارتباط ژنتیکی با نمونه برداشت شده ندارند، در تعیین آنومالی تاثیر می‌گذارد. از این رو برای بهبود این روش، از شاخص غنی‌شدگی^۱ عناصر برای پیاده‌سازی آن استفاده شد. ابتدا تعداد نمونه‌ها برای واحدهای سنگی موجود در منطقه تعیین شد. برای حذف مولفه سین‌ژتیک نقشه زمین‌شناسی با نقشه نمونه‌برداری آبراه‌ای منطبق شده، سپس با تعیین حوضه آبریز هر نمونه (بالادست نمونه) همه واحدهای سنگی که رسوبات حاصل از فرسایش آن‌ها در تشکیل نمونه نقش داشته‌اند، شناسایی شد. پس از جداسازی جوامع آماری، در هر جامعه آماری به وسیله نرمالیز کردن مقادیر هر متغیر ژئوشیمیایی نسبت به تعیین میانه اقدام و ضریب غنی‌شدگی

^۱ Enrichment Index (EI)

$$EI = \frac{\text{غلظت عنصر در نمونه}}{\text{میانگین عنصر در تیپ سنگی خاص}} \quad (2)$$

جوامع دارای کمتر از ۱۰ نمونه با یکدیگر ادغام شد و تحت عنوان یک جامعه آماری مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- خلاصه انواع سنگ‌های بالادست نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای در نقشه ۱:۲۰۰۰۰ خوشنامه

علائم انتخابی	توصیف واحدهای سنگی در نقشه	علائم واحد سنگی در نقشه
OL ^v	سنگ‌های آذرین: تراکی بازال تا تراکی آندزیت قهوه‌ای، ریولیت، ریو داسیت	OL ^{v1} , OL ^{v2}
Ng	واحد مارن، سیلتستون و ماسه سنگ سرخ رنگ	Ng ^{m2}
PQ	سنگ‌های رسوبی: کنگلومرا، ماسه سنگ، رسوبات آبرفتی، آهک ماسه‌دار، مارن‌های توفوژن، پیروکلاست‌های اسیدی	PL ^c , Qt ₁ , Qal, Pg _z , P _t
VOL	سنگ‌های ولکانیکی: آندزیت تا داسیت، سنگ‌های آتشفشانی بازیک، واحد خاکستر آتشفشانی	E ^{da} ₁ , E ^{da} ₂ , E ^m , E ^{ash} , E ^{v1}

۴- بحث و نتایج

۴-۱- نتایج روش آماره فضایی U

و رسیدن به منطقه آنومال (فازهای کانی‌سازی) است و مرز تقریبی ناحیه آنومال و مقادیر زمینه به شمار می‌رود. در کنار عنصر طلا، عناصر سرب، آرسنیک، بیسموت و آنتیموان نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مربوط در شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده است. توزیع فراوانی داده‌های U* این عناصر نیز یک کمترین در نقطه صفر نشان می‌دهد.

نتایج با استفاده از مقادیر حدآستانه‌های $\bar{U}+SD$ و $\bar{U}+2SD$ به دست آمد و به ترتیب آنومالی ممکن و آنومالی قطعی در نظر گرفته شد. در این معیارها \bar{U} میانگین و SD انحراف معیار مقادیر U است. این مقادیر حدآستانه‌ای برای عنصر طلا به ترتیب ۱٫۵۷ و ۳٫۰۶ به دست آمد. جدول ۲ مقادیر حدآستانه‌ای به دست آمده از روش آماره فضایی U برای پنج عنصر Au, Sb, Pb, As, Bi را با معیارهای یاد شده نشان می‌دهد.

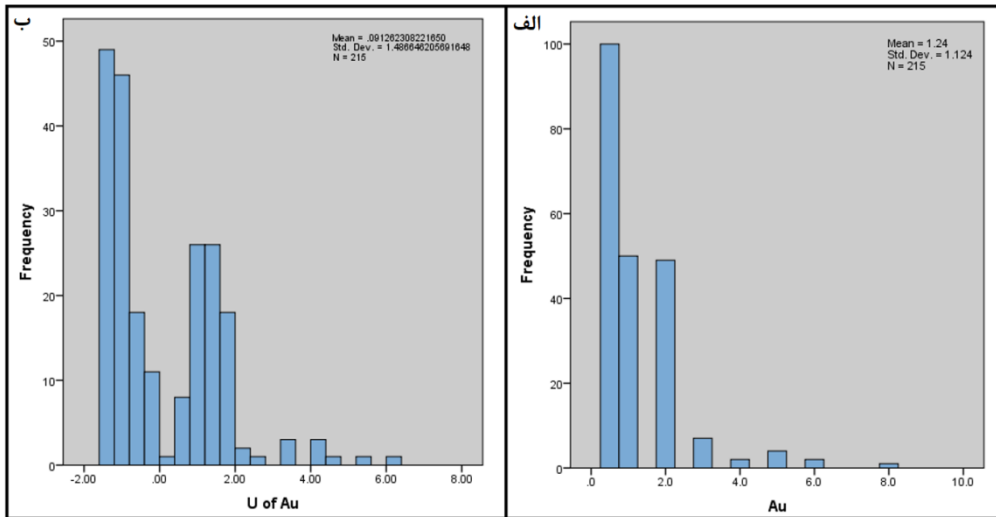
جدول ۲- مقادیر حدآستانه‌ای بدست آمده از روش آماره فضایی U

عناصر	$\bar{U}+SD$	$\bar{U}+2SD$
Bi	۳٫۱۴	۱٫۵۹
Au	۳٫۰۶	۱٫۵۷
Sb	۳٫۱	۱٫۶
Pb	۳٫۰۶	۱٫۵۵
As	۳٫۲۵	۱٫۶۷

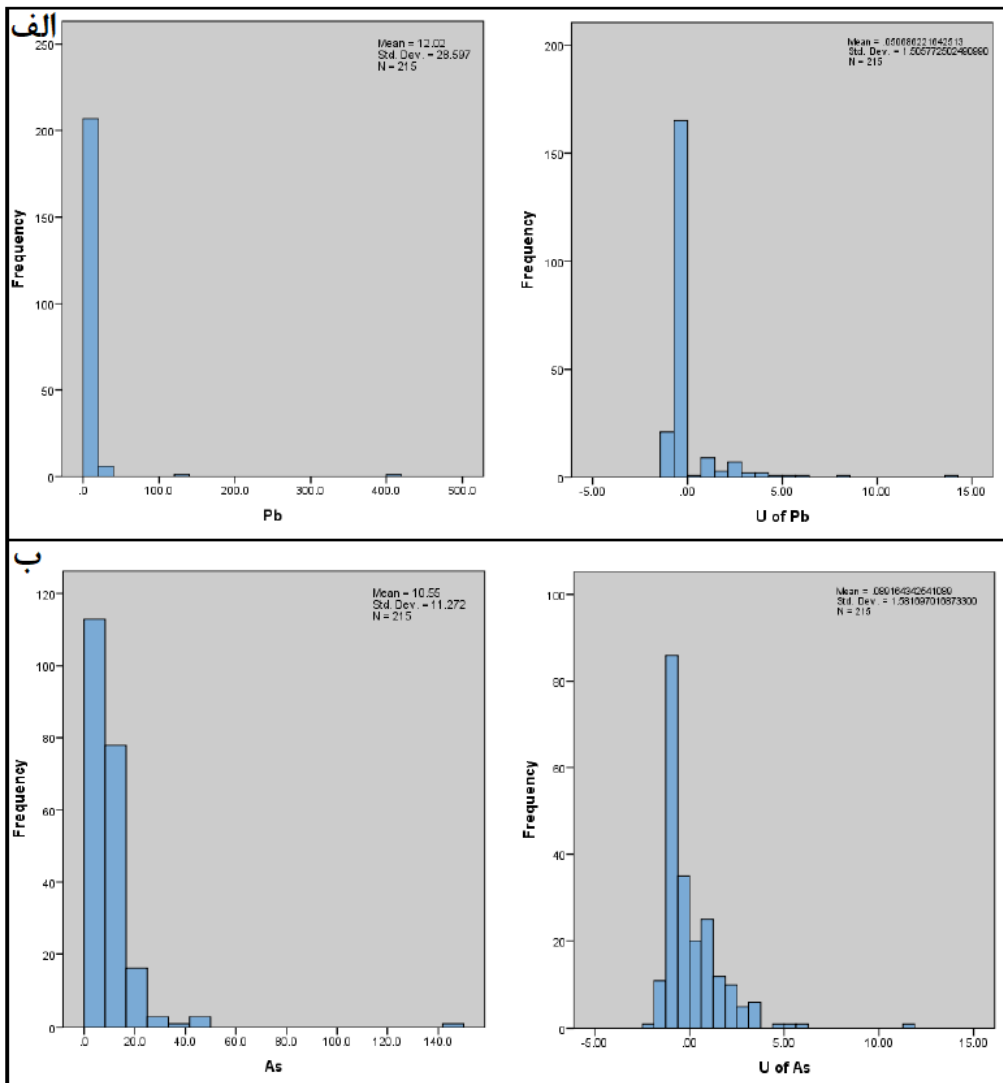
خاص در آن جامعه به میانه آن، ضریب غنی‌شدگی عنصر مربوط طبق رابطه ۲ محاسبه شد که در آن EI شاخص غنی‌شدگی عنصر مورد مطالعه است.

برای مدل سازی داده‌های خام ژئوشیمیایی منطقه مطالعاتی با روش آماره فضایی U، الگوریتم این روش، در محیط نرم افزار متلب^۱ بر روی داده‌های خام کدنویسی شد. طبق این الگوریتم، مقادیر U هر نقطه نمونه برداری از شعاع همسایگی صفر تا ۵۰۰۰ متر (r_{max}) محاسبه شد. پس از محاسبه مقادیر U برای هر نقطه، بزرگ‌ترین مقدار آن از نظر قدر مطلق به عنوان U بهینه به نقطه مورد نظر اختصاص داده شد. این محاسبات برای برای غلظت عناصر Au, Sb, As, Bi, Pb, Cd با ۲۱۵ نمونه انجام گرفت، محاسبه از دایره‌ای به شعاع صفر تا ۵۰۰۰ متر انجام شد. برای دقت لازم در محاسبات، فاصله بین شعاع دو دایره ده متر در نظر گرفته شد. بنابراین برای هر نقطه نمونه برداری ۵۰۰ دایره رسم و مقدار U برای تک تک دایره‌ها محاسبه شد. سپس از بین مقادیر به دست آمده برای U، بیشترین مقدار به عنوان U* ذخیره شد. هیستوگرام فراوانی مقادیر خام و U عنصر طلا در شکل‌های ۷-الف و ب نشان داده شده است. همانطور که در هیستوگرام داده‌های خام دیده می‌شود (شکل ۷-الف)، عنصر طلا از توزیع غیرنرمال پیروی می‌کند. بعد از پیاده‌سازی الگوریتم روش آماره فضایی U، هیستوگرام مقادیر به صورت شکل ۷-ب درآمده است. کمترین در نقطه صفر در این شکل، نشان‌دهنده خروج از محدوده زمینه

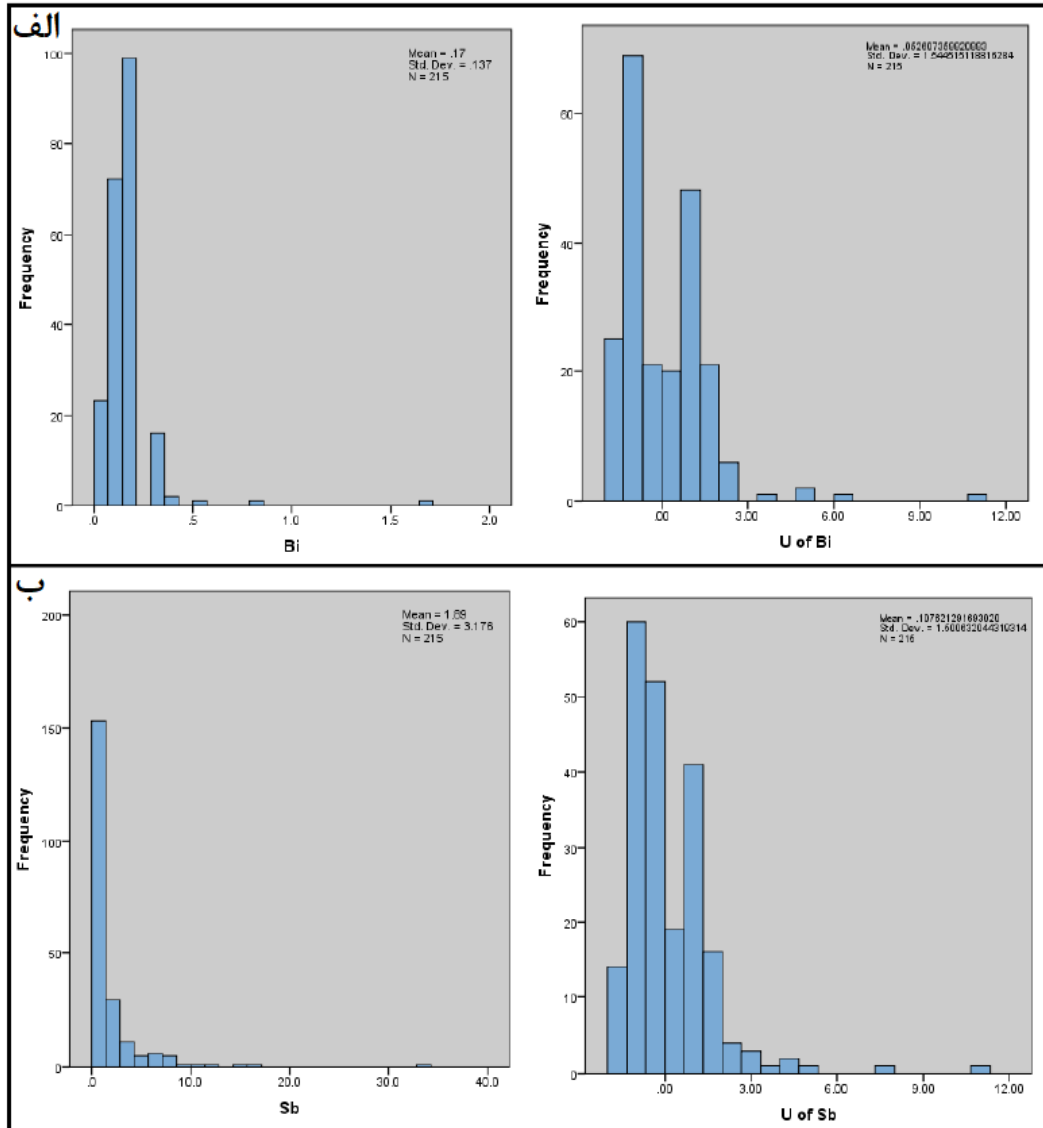
¹ MATLAB



شکل ۷- توزیع فراوانی مقادیر عنصر طلا برای ۲۱۵ نمونه عنصر طلا، الف- داده‌های خام، ب- مقادیر U^*



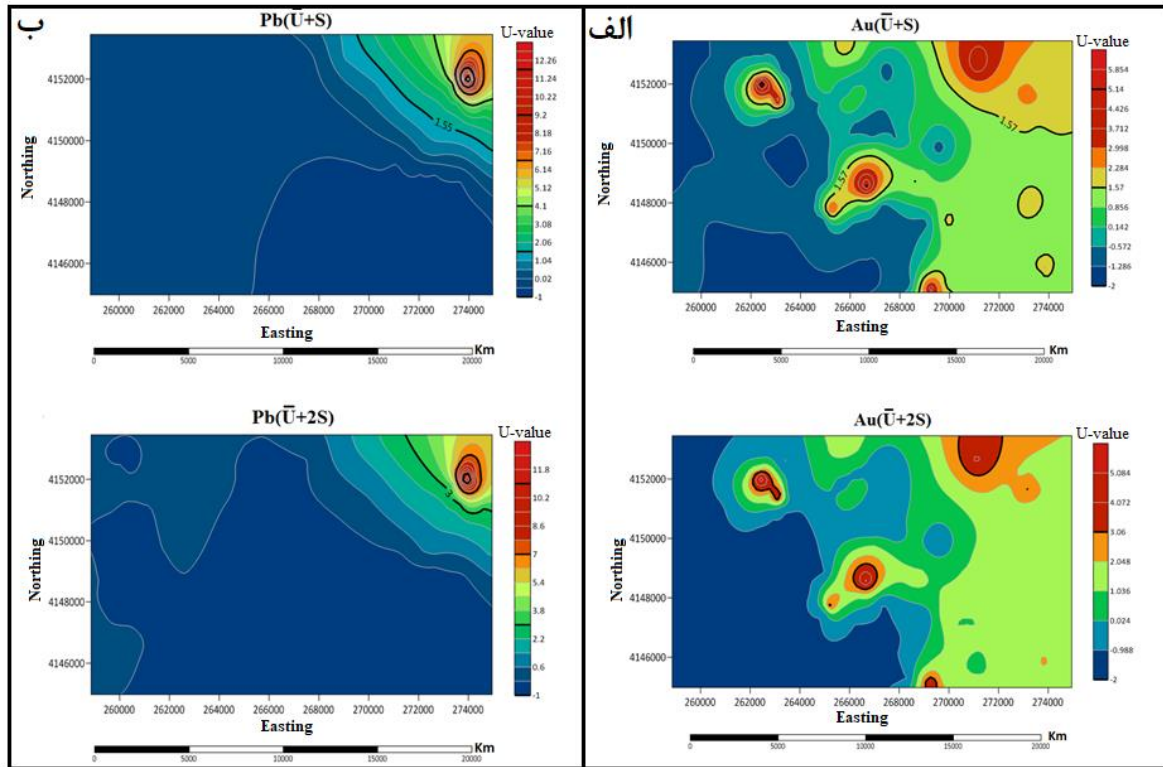
شکل ۸- توزیع فراوانی مقادیر عناصر سرب (الف) و آرسنیک (ب) برای داده‌های خام و مقادیر U^*



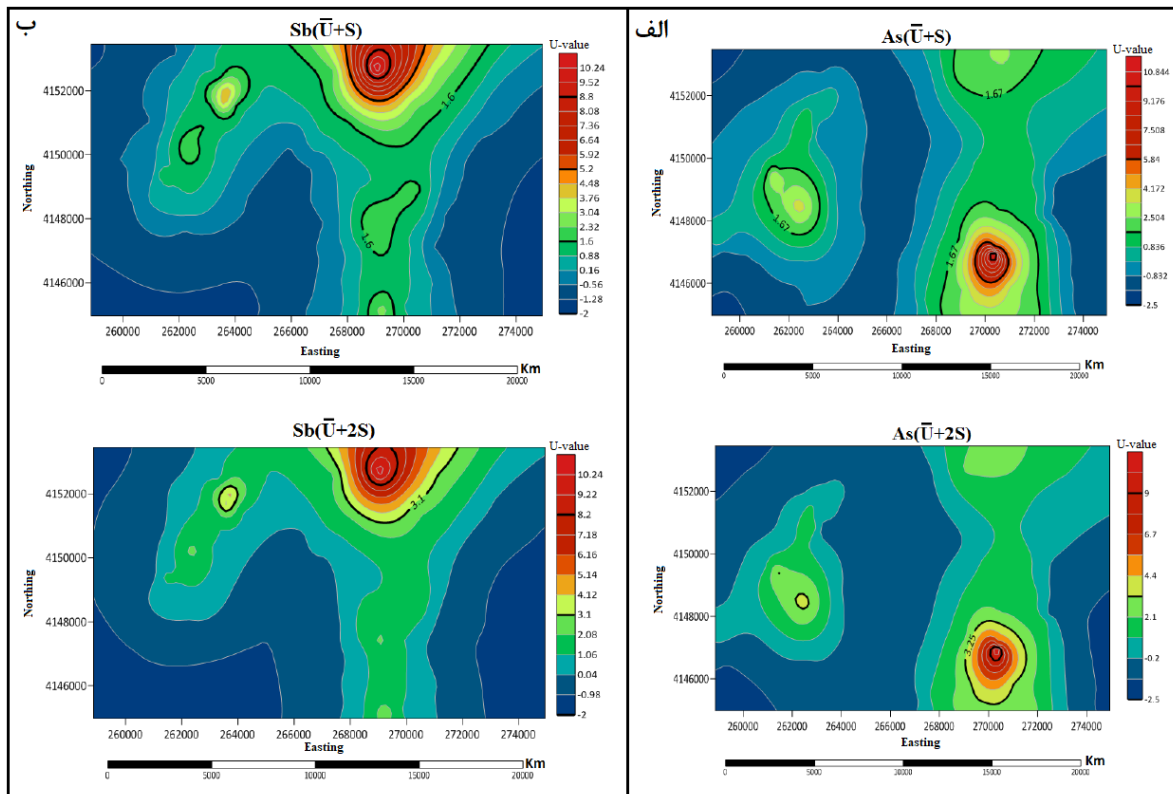
شکل ۹- توزیع فراوانی مقادیر عناصر بیسموت (الف) و آنتیموان (ب) برای داده‌های خام و مقادیر U^*

عنصر طلا در قسمت شمال شرق و مرکز منطقه دارای غلظت بالای ژئوشیمیایی است و مناطق پتانسیل‌دار آن در این زون واقع شده است (شکل ۱۰-الف). مناطق پتانسیل‌دار عنصر سرب همبستگی بسیار خوبی با عنصر طلا نشان می‌دهد (شکل ۱۰-ب). در شکل ۱۱-الف دیده می‌شود که عنصر آرسنیک به صورت پراکنده در منطقه توزیع شده است اما شدت آنومالی در بخش جنوبی زیاد شده است. در شکل ۱۱-ب نیز نقشه مناطق آنومال عنصر آنتیموان دیده می‌شود که گستردگی و توزیع فضایی این عنصر نشان از همبستگی فضایی در قسمت شمالی منطقه با طلا دارد.

نقشه ژئوشیمیایی مناطق پتانسیل‌دار حاصل از روش آماره فضایی U برای عناصر طلا و سرب در شکل ۱۰ آورده شده است. برای رسم این نقشه‌های ژئوشیمیایی تک عنصری، ابتدا داده‌ها با روش تخمین کریجینگ درون‌یابی شدند. بر روی این نقشه‌ها محدوده‌های آنومال داخل کنتورهایی با منحنی ممتد ضخیم و تغییر شدت رنگ از آبی به سبز سپس رنگ قرمز برای عیارهای بالاتر و همچنین با آوردن مقدار حدآستانه‌ای روی نقشه (با واحد U)، مشخص شده است. این نقشه‌ها از روی داده‌های مدل‌سازی شده تهیه شده است که نشان‌دهنده چگونگی توزیع عناصر در سطح منطقه مورد مطالعه نیز است.



شکل ۱۰- نقشه مناطق پتانسیل دار حاصل از روش آماره فضایی U برای عناصر طلا (الف) و سرب (ب) با استفاده از معیارهای $\bar{U}+SD$ و $\bar{U}+2SD$



شکل ۱۱- نقشه مناطق پتانسیل دار حاصل از روش آماره فضایی U برای عناصر آرسنیک (الف) و آنتیموان (ب) با استفاده از معیارهای $\bar{U}+SD$ و $\bar{U}+2SD$

۲-۴- نتایج مدل سازی داده‌های شاخص غنی شدگی عناصر با روش آماره فضایی U

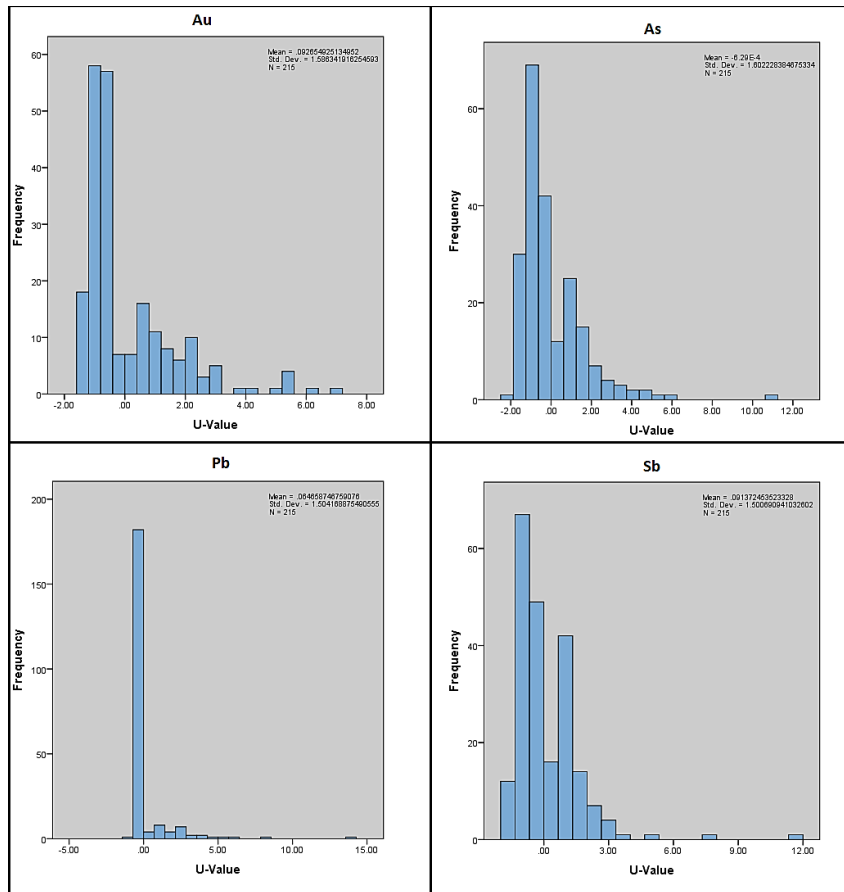
بعد از به دست آوردن داده‌های شاخص غنی شدگی عناصر، این داده‌ها با روش آماره فضایی U مدل سازی شد. بدین منظور در ورودی کد روش یاد شده، به جای داده‌های خام از شاخص غنی شدگی عناصر استفاده شد. هیستوگرام فراوانی مربوط به مقادیر U^* هر یک از عناصر Au، As، Pb، Sb در شکل ۱۲ آورده شده است. همه عناصر بر طبق هیستوگرام در نقطه صفر یک مینیمم نشان می‌دهد که مرز تقریبی جدایش آنومالی ژئوشیمیایی از مقادیر زمینه است که مبین خروج از منطقه زمینه و رسیدن به منطقه آنومال است.

در روش مدل سازی آماره فضایی U داده‌های شاخص غنی شدگی، حد آستانه‌ای مقادیر U داده‌ها با استفاده از

معیارهای $\bar{U}+SD$ و $\bar{U}+2SD$ محاسبه شد. این مقادیر حد آستانه برای عنصر طلا به ترتیب ۱۶۷ و ۳۲۶ به دست آمد. جدول ۳ مقادیر حد آستانه‌ای به دست آمده از این روش را برای چهار عنصر Au، As، Pb و Sb با معیارهای یاد شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج مدل سازی داده‌های شاخص غنی شدگی رسوبات آبراه‌های منطقه خوشنامه با روش آماره فضایی U

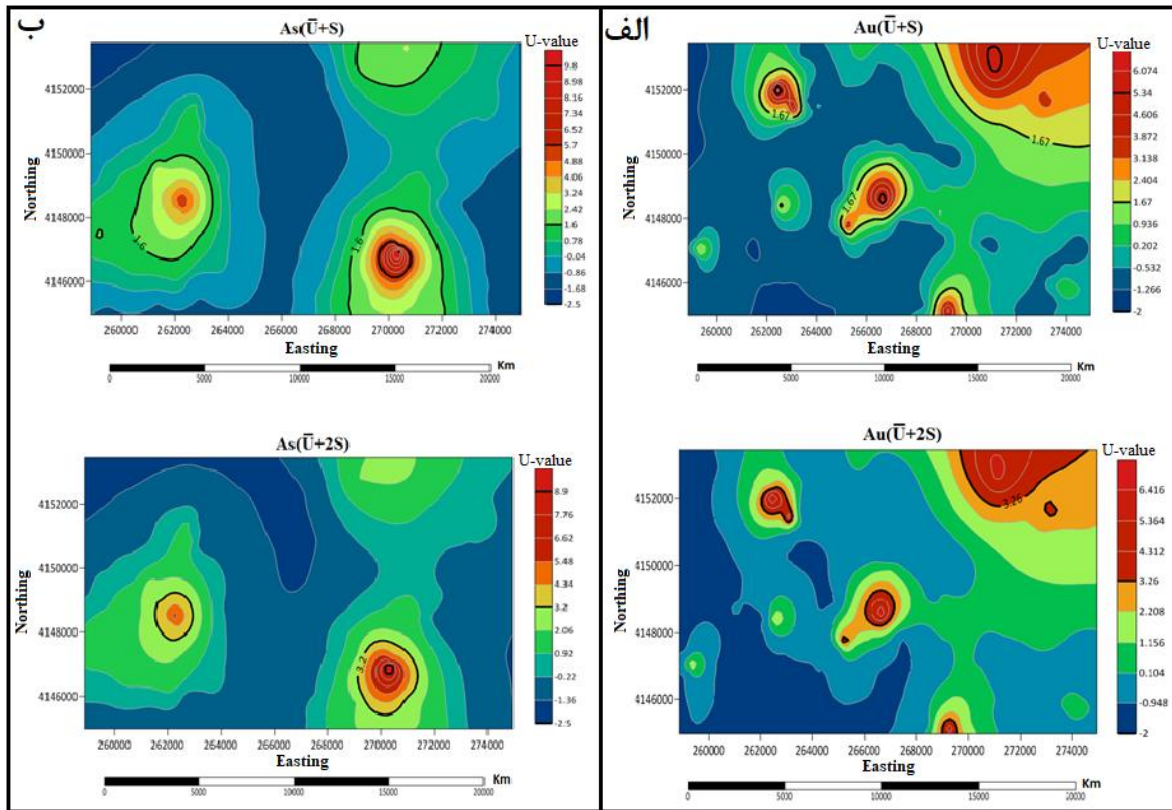
عنصر	$\bar{U}+2SD$	$\bar{U}+SD$
Au	۳۲۶	۱۶۷
As	۳۲۰	۱۶۰
Pb	۳۰۷	۱۵۶
Sb	۳۰۹	۱۵۹



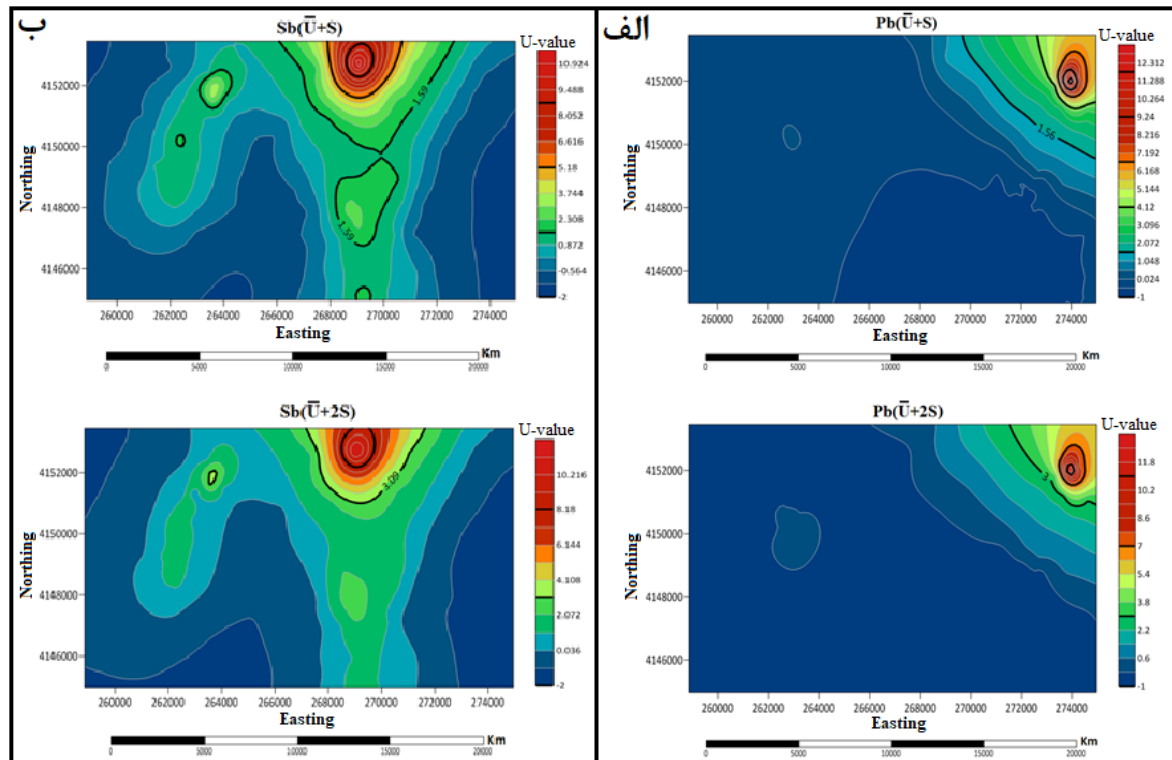
شکل ۱۲- هیستوگرام مقادیر U^* برای عناصر Au، As، Pb، Sb با روش مدل سازی آماره فضایی U داده‌های شاخص غنی شدگی

مناطق پتانسیل دار عنصر آرسنیک در بخش جنوبی و بخش غربی منطقه قرار دارند و در این زون غلظت بالای ژئوشیمیایی دارد (شکل ۱۳- ب). نقشه ژئوشیمیایی عناصر سرب و آنتیموان در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که این عناصر در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه دارای غلظت بالای ژئوشیمیایی و جزو مناطق امیدبخش برای اکتشاف این عناصر است. گستردگی و توزیع فضایی این دو عنصر همبستگی فضایی خوبی در قسمت شمالی منطقه با طلا نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نقشه ژئوشیمیایی تک‌عنصری مناطق پتانسیل دار حاصل از مدل سازی داده‌های شاخص غنی شدگی با روش آماره فضایی U است. برای جداسازی مناطق آنومال از معیارهای $\bar{U}+SD$ و $\bar{U}+2SD$ استفاده شد. طبق این نقشه‌ها، توزیع‌های آنومالی متفاوتی برای عناصر قابل تشخیص است. مطابق شکل ۱۳- الف عنصر طلا در بخش شرق، شمال غرب و مرکز منطقه دارای غلظت بالای ژئوشیمیایی است و مناطق امیدبخش طلا در این مناطق واقع شده‌اند.



شکل ۱۳- نقشه مناطق پتانسیل دار حاصل از روش مدل سازی آماره فضایی U داده های شاخص غنی شدگی برای عناصر طلا (الف) و آرسنیک (ب) با استفاده از معیارهای $\bar{U}+SD$ و $\bar{U}+2SD$

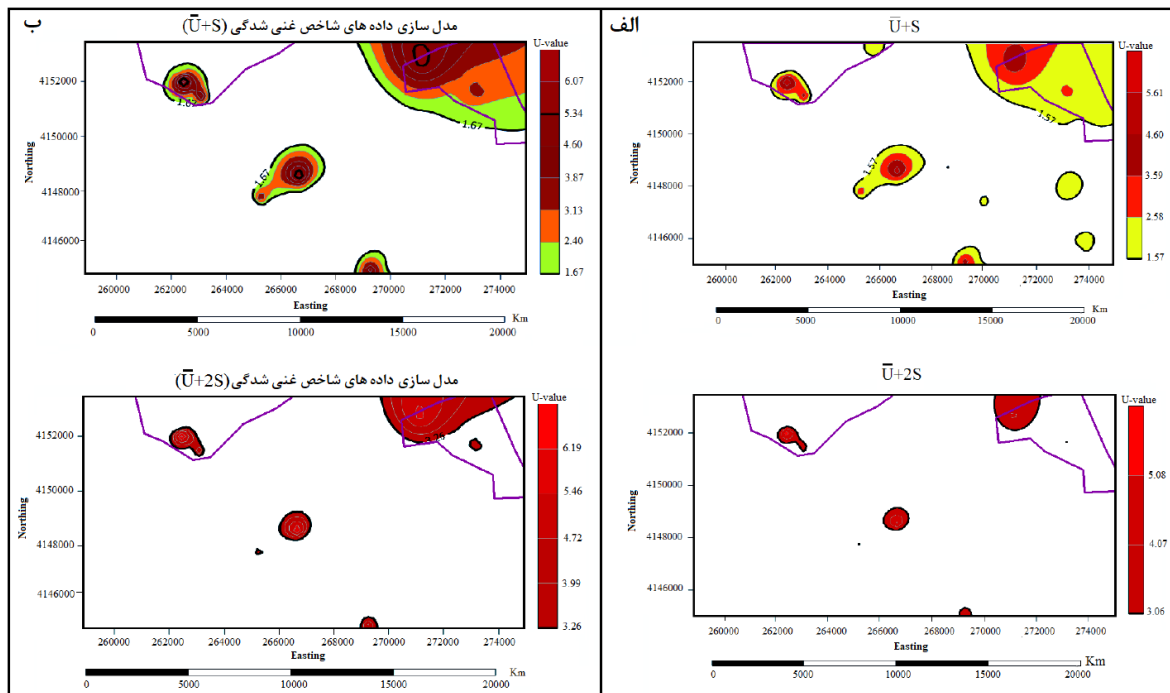


شکل ۱۴- نقشه مناطق پتانسیل دار حاصل از روش مدل سازی آماره فضایی U داده های شاخص غنی شدگی برای عناصر سرب (الف) و آنتیموان (ب) با استفاده از معیارهای $\bar{U}+SD$ و $\bar{U}+2SD$

جنوب شرق منطقه با روش آماره U به دست آمده است حذف کند و با بهبود روش آماره فضایی U نتایج بهتری را ارائه دهد. به نظر می‌رسد دلیل بهبود نتایج، به در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین‌شناسی بالادست نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای در روش یاد شده برمی‌گردد. روش مدل‌سازی آماره U داده‌های شاخص غنی‌شدگی عناصر مانند روش آماره فضایی U یک آنومالی با شدت زیاد در مرکز منطقه نشان می‌دهد که با اکتشافات محلی و ناحیه‌ای کشف شده است. به نظر می‌رسد این منطقه به مطالعات اکتشافی بیشتری نیاز داشته باشد. در نهایت نتایج در هر دو روش انطباق بیشتری با واقعیت‌های میدانی داشته و به نظر می‌رسد این معیار بهترین معیار برای جداسازی مناطق آنومال است. همچنین با توجه به اینکه در نقشه نهایی مربوط به مدل‌سازی داده‌های شاخص غنی‌شدگی به وسیله روش آماره فضایی U برخی از آنومالی‌های کاذب حذف شده است، به نظر می‌رسد که اثرات مثبت شاخص غنی‌شدگی عناصر باعث بهبود روش آماره فضایی U شده است و این روش تلفیقی جدید اطمینان بیشتری نسبت به روش آماره U دارد.

۴-۳- اعتبارسنجی و بررسی کارایی روش مدل‌سازی آماره U داده‌های شاخص غنی‌شدگی عناصر

با توجه به در دسترس بودن اطلاعات مربوط به عنصر طلا، برای مقایسه روش مدل‌سازی آماره U داده‌های شاخص غنی‌شدگی عناصر با روش‌های آماره فضایی U و اعتبارسنجی و بررسی کارآرایی این روش از نتایج میدانی (شامل اندیس‌های کشف شده در منطقه) استفاده شد. برای این کار اندیس‌های معرفی شده برای عنصر طلا حاصل از اکتشافات محلی و ناحیه‌ای بر روی مناطق آنومال به دست آمده از دو روش، منطبق شد. شکل ۱۵-الف نتایج مربوط به مناطق آنومال به دست آمده از روش آماره فضایی U را نشان می‌دهد. در این روش هر دو اندیس منطقه با روش آماره فضایی U به دست آمده از معیار $\bar{U}+S$ تطبیق بیشتری با اطلاعات میدانی منطقه دارد. شکل ۱۵-ب نقشه‌های مناطق آنومال به دست آمده از روش مدل‌سازی آماره U داده‌های شاخص غنی‌شدگی عناصر را نشان می‌دهد. در این روش نیز معیار $\bar{U}+S$ گستردگی هاله‌های ژئوشیمیایی مناسبی را نسبت به روش $\bar{U}+2S$ نشان می‌دهد. این روش توانسته است آنومالی‌های کاذب مختلفی که در



شکل ۱۵- مناطق آنومال ژئوشیمیایی به دست آمده از الف- روش آماره فضایی U؛ ب- مدل‌سازی داده‌های شاخص غنی‌شدگی عناصر با روش آماره فضایی U

۵- نتیجه‌گیری

شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- طبق نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، عناصر سرب، آرسنیک، آنتیموان، باریم، مولیبدن، قلع،

یک روش تلفیقی جدید بر پایه شاخص غنی‌شدگی عناصر و الگوریتم روش آماره فضایی U در این پژوهش توسعه داده

- from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51, 109–130.
5. Cheng, Q., (1999), Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical exploration*, 65: 175-194.
 6. Cheng, Q., Xu, Y. and Grunsky, E., 2000, Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research*, 9: 43-52.
 7. Gonçalves, M.A., Mateus, A. and Oliveira, V., 2001, Geochemical anomaly separation by multifractal modelling. *Journal of Geochemical Exploration*, 72: 91-114.
 8. Li, C., Ma, T. and Shi, J., (2003), Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background. *Journal of Geochemical exploration*, 77: 167-175.
 9. Lima, A., De Vivo, B., Cicchella, D., Cortini, M. and Albanese, S., 2003, Multifractal IDW interpolation and fractal filtering method in environmental studies: an application on regional stream sediments of (Italy), Campania region. *Applied geochemistry*, 18: 1853-1865.
 10. Zuo, R., Cheng, Q. and Xia, Q., (2009), Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration. *Journal of Geochemical Exploration*, 102: 37-43.
 11. Ghannadpour, S.S. and Hezarkhani, A., (2016), Introducing 3D U-statistic method for separating anomaly from background in exploration geochemical data with associated software development. *Journal of Earth System Science*, 125: 387-401.
 12. Ghezelbash, R. and Maghsoudi, A., 2018, Comparison of U-spatial statistics and C-A fractal models for delineating anomaly patterns of porphyry-type Cu geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. *Comptes Rendus Geoscience*, 350: 180-191.
 13. Liu, Y., Cheng, Q., Carranza, E.J.M. and Zhou, K., 2019, Assessment of geochemical anomaly uncertainty through geostatistical simulation and singularity analysis. *Natural Resources Research*, 28: 199-212.
 14. Yousefi, M., Kreuzer, O.P., Nykänen, V. and Hronsky, J.M., (2019), Exploration information systems-a proposal for the future use of GIS in mineral exploration targeting. *Ore Geology Reviews*: 103005.
 15. Seyedrahimi-Niaraq, M. and Mahdiyanfar, H., 2021. Introducing a new approach of geochemical anomaly intensity index (GAI) for increasing the probability of exploration of shear zone gold mineralization. *Geochemistry*, 81(4), p.125830.
- پتاسیم همبستگی مثبتی با عنصر مورد تحقیق طلا نشان می‌دهند.
- طبق نقشه‌های تهیه شده از طریق روش آماره فضایی U، عنصر طلا در قسمت شمال شرق و مرکز منطقه دارای غلظت بالای ژئوشیمیایی است.
 - نقشه‌های تهیه شده از طریق مدل‌سازی داده‌های شاخص غنی‌شدگی عناصر به روش مدل‌سازی آماره U، نشان از غلظت بالای ژئوشیمیایی عنصر طلا در شمال شرق، شمال غرب و مرکز منطقه مورد مطالعه است. در حالت کلی نتایج مشابهی با دو روش به دست آمده است اما با توجه به قابلیت‌های شاخص غنی‌شدگی عناصر در روش تلفیقی جدید، به نظر می‌رسد که این روش با در نظر گرفتن بالادست نمونه‌های برداشت شده از رسوبات آبراهه‌ای و اثرات ثانویه‌ای حوضه آبریز بر نمونه‌ها، نتایج با اطمینان بیشتری را در اختیار قرار می‌دهد. این نتیجه در مقایسه روش‌ها برای عنصر طلا کاملاً مشاهده می‌شود. روش جدید توانست ضمن معرفی هر دو اندیس منطقه با معیار $\bar{U}+S$ ، آنومالی کاذب به دست آمده از روش آماره فضایی U را حذف کند و نتایج این روش را بهبود ببخشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مدل‌سازی داده‌های اکتشافی رسوبات آبراهه‌ای، یک تحلیل اولیه برای بدست آوردن شاخص غنی‌شدگی عناصر قبل از اعمال روش‌های ساختاری ژئوشیمی برای روی داده‌های خام انجام پذیرد.
 - هر دو روش علاوه بر دو اندیس طلای به دست آمده از اکتشافات ناحیه‌ای، یک اندیس قابل تامل در مرکز منطقه را نیز نشان داد و به نظر می‌رسد در این منطقه لازم است مطالعات بیشتر اکتشافی انجام شود.
- منابع**
1. Sinclair, A.J., 1974. Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. *Journal of Geochemical Exploration*, 3(2), pp.129-149.
 2. Sinclair, A.J., 1991. A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited. *Journal of Geochemical Exploration*, 41(1-2), pp.1-22.
 3. Yusta, I., Velasco, F. and Herrero, J.-M., (1998), Anomaly threshold estimation and data normalization using EDA statistics: application to litho-geochemical exploration in Lower Cretaceous Zn-Pb carbonate-hosted deposits, northern Spain. *Applied geochemistry*, 13: 421-439.
 4. Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies

- for mineral prospectivity modeling. *Computers & Geosciences*, 79: 69-81.
29. Zuo, R., 2017. Machine learning of mineralization-related geochemical anomalies: A review of potential methods. *Natural Resources Research*, 26(4), pp.457-464.
 30. Wang, Z., Zuo, R. and Dong, Y., 2019. Mapping geochemical anomalies through integrating random forest and metric learning methods. *Natural Resources Research*, 28(4), pp.1285-1298.
 31. Ziiai, M., Safaria, S., Timkinb, T., Voroshilovb, Va. and Yakichb, T., 2019, Identification of geochemical anomalies of the porphyry-Cu deposits using concentration gradient modelling: A case study, Jebal-Barez area, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 199:16-30.
 32. Grunsky, E.C. and de Caritat, P., 2020. State-of-the-art analysis of geochemical data for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(2), pp.217-232.
 33. Muller, J., Kylander, M., Martinez-Cortizas, A., Wüst, R.A., Weiss, D., Blake, K., et al., 2008. The use of principle component analyses in characterising trace and major elemental distribution in a 55kyr peat deposit in tropical Australia: implications to paleoclimate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (2), 449-463.
 34. Vicente, V.A., Pratas, J.A., Santos, F.C., Silva, M.M., Favas, P.J. and Conde, L.E., 2021. Geochemical anomalies from a survey of stream sediments in the Maquelab area (Oecusse, Timor-Leste) and their bearing on the identification of mafic-ultramafic chromite rich complex. *Applied Geochemistry*, 126, p.104868.
 35. Grunsky, E.C., Drew, L.J., Sutphin, D.M., 2009. Process recognition in multi-element soil and stream-sediment geochemical data. *Applied Geochemistry*, 24, 1602-1616
 36. Chandrajith, R., Dissanayake, C.B., Tobschall, H.J., 2001. Application of multi-element relationships in stream sediments to mineral exploration: a case study of Walawe Ganga Basin, Sri Lanka. *Applied Geochemistry* 16, 339-350.
 37. Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., Carranza, E. J. M., 2012. Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 115, 24-35.
 38. Helba, H.A., El-Makky, A.M. and Khalil, K.I., 2021. Application of CN fractal model, factor analysis, and geochemical mineralization probability index (GMPI) for delineating geochemical anomalies related to Mn-Fe deposit and associated Cu mineralization in west-central
 16. Govett, G., Goodfellow, W., Chapman, R. and Chork, C., 1975, Exploration geochemistry—distribution of elements and recognition of anomalies. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 7: 415-446.
 17. Mandelbrot, B.B., Pignoni, R., 1983, The fractal geometry of nature, WH freeman, New York. vol 173.
 18. Solovov, A.P., 1985, Geochemical prospecting for mineral deposits. Mir Publisher.
 19. Stanley, C.R. and Sinclair, A.J., 1989, Comparison of Probability Plots and the Gap statistic in selection of Threshold of Exploration Geochemistry Data. *Journal of Geochemical Exploration*. 32:355-357.
 20. Agterberg, F.P., Cheng, Q., Brown, A. and Good, D., 1996, Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba. *Computers & Geosciences*, 22:497-507.
 21. Cheng, Q., Agterberg, F. and Bonham-Carter, G., 1996, A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical exploration*, 56: 183-195.
 22. Lin, Y.P., 2002, Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals. *Environmental Geology*, 42:1-10.
 23. Rantitsch, G., 2004, Geochemical exploration in a mountainous area by statistical modeling of polypopulational data distributions. *Journal of Geochemical Exploration*, 82: 79-95.
 24. Afzal, P., Alghalandis, Y.F., Khakzad, A., Moarefvand, P., Omran, N.R., 2011, Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling. *Journal of Geochemical exploration*, 108: 220-232.
 25. Cheng, Q., Xia, Q., Li, W., Zhang, S., Chen, Z., Zuo, R. and Wang, W., 2010, Density/area power-law models for separating multi-scale anomalies of ore and toxic elements in stream sediments in Gejiu mineral district, Yunnan Province, China. *Biogeosciences*, 7:3019-3025.
 26. Cheng, Q., Bonham-Carter, G., Wang, W., Zhang, S., Li, W. and Qinglin, X. 2011, A spatially weighted principal component analysis for multielement geochemical data for mapping locations of felsic intrusions in the Gejiu mineral district of Yunnan, China. *Computers & Geosciences*, 37: 662-669.
 27. Carranza, E.J.M., Zuo, R. and Cheng, Q., 2012. Fractal/multifractal modelling of geochemical exploration data. *Journal of Geochemical Exploration*, 122, pp.1-3.
 28. Yousefi, M. and Carranza, E.J.M., 2015, Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps

45. Parsa, M., Sadeghi, M. and Grunsky, E., 2022. Innovative methods applied to processing and interpreting geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*, p.106983.
46. Seyedrahimi-Niarag, M. and Hekmatnejad, A., 2021. The efficiency and accuracy of probability diagram, spatial statistic and fractal methods in the identification of shear zone gold mineralization: a case study of the Saqqez gold ore district, NW Iran. *Acta Geochimica*, 40(1), pp.78-88.
۴۷. توسعه علوم زمین، ۱۳۸۲، اکتشافات ژئوشیمیایی سیستماتیک در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتجین، ۱۳۸۲، گزارش سازمان صنعت، معدن و تجارت استان اردبیل.
48. Afzal, P., Asl, R.A., Adib, A. and Yasrebi, A.B., 2015. Application of fractal modelling for Cu mineralisation reconnaissance by ASTER multispectral and stream sediment data in Khoshname area, NW Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43(1), pp.121-132.
۴۹. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، ۱۳۸۵، گزارش وضعیت اکتشاف طلا در ایران.
۵۰. مهندسی مشاور زرناب اکتشاف، ۱۳۸۵، اکتشاف عناصر پلی متال (طلا و سایر عناصر) در محدوده روستای خوشنامه هشتجین، ۱۳۸۲، گزارش سازمان صنعت، معدن و تجارت استان اردبیل.
- Sinai, Egypt. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*.
39. Gonbadi, A.M., Tabatabaei, S.H., Carranza, E.J.M., 2015. Supervised geochemical anomaly detection by pattern recognition. *J. Geochem. Explor.* 157, 81–91.
40. Zhang, C., Zuo, R. and Xiong, Y., 2021. Detection of the multivariate geochemical anomalies associated with mineralization using a deep convolutional neural network and a pixel-pair feature method. *Applied Geochemistry*, 130, p.104994.
41. Luo, Z., Zuo, R., Xiong, Y. and Wang, X., 2021. Detection of geochemical anomalies related to mineralization using the GANomaly network. *Applied Geochemistry*, p.105043.
42. Zhang, L., Bai, G., Xu, Y., 2003. A wavelet-analysis-based new approach for interference elimination in geochemical hydrocarbon exploration. *Math. Geol.* 35 (8), 939–952
43. Shahi, H., Ghavami, R., Rouhani, A.K., Kahoo, A.R. and Haroni, H.A., 2015. Application of Fourier and wavelet approaches for identification of geochemical anomalies. *Journal of African Earth Sciences*, 106, pp.118-128.
44. Pourgholam, M.M., Afzal, P., Yasrebi, A.B., Gholinejad, M. and Wetherelt, A., 2021. Detection of geochemical anomalies using a fractal-wavelet model in Ipack area, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 220, p.106675.