



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

## Assessment of landfill and municipal wastewater impact on groundwater in the aquifer of Hamzeh city, northeast of Dezful, using the self-organizing map method

Mohammad Kaveh Cholcheh<sup>1</sup>, Farshad Alijani<sup>2\*</sup>, Hamid Reza Nassery<sup>3</sup>

1, 2, 3. Department of Mineral and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### Article info

#### Article history

Received: 29 September 2025

Accepted: 25 December 2025

#### Keywords:

Groundwater pollution, Landfill, Hydrochemistry, Self-organizing map, Hamzeh city.



### Abstract

In recent years, Hamzeh city, located to the east of Dezful, has faced increasing nitrate contamination in drinking water wells, with landfill leachate and urban wastewater proposed as the main potential sources of pollution. To investigate the origin of nitrate and the influence of geological factors, groundwater samples were collected from ten pumping wells during January 2018, August 2018, and November 2018. The samples were analyzed for major ions and nitrate concentrations. Statistical analysis, factor analysis, saturation indices, Piper diagrams, and electrical conductivity (EC) and chloride contour maps identified halite dissolution as the most significant geological process controlling groundwater hydrochemistry. Based on hierarchical cluster analysis and self-organizing maps (SOM), the samples were classified into three distinct groups. Group 1, located in the northern part of the study area, is characterized by the lowest EC values (approximately 500  $\mu\text{mho/cm}$ ) and dissolved solids. Group 3, situated in the southern part of the area, exhibits the highest EC values (approximately 1000  $\mu\text{mho/cm}$ ) and dissolved solids, while Group 2, located in the central part of the study area, shows intermediate characteristics. The progressive increase in EC from Group 1 to Group 3 is attributed to halite dissolution within the Aghajari and Lahbari formations. Previous analyses showed no significant correlation between nitrate and other hydrochemical variables. Nitrate contour maps indicate that the highest nitrate concentrations occur in the southern part of the city, coinciding with the direction of groundwater flow. Additionally, elevated nitrate concentrations were observed in agricultural areas at the end of the growing season. Therefore, urban wastewater is identified as the primary source, and agricultural activities as a secondary source of nitrate contamination in the study area, while no significant impact of the landfill on groundwater quality was detected. Overall, the results demonstrate the effectiveness of the SOM approach in clustering groundwater samples and identifying the dominant factors affecting groundwater quality.

### Introduction

Hydrogeochemical analysis forms the core framework for assessing groundwater quality in aquifer systems by examining the chemical interactions among water, rock, and gas phases within subsurface environments. Understanding these geochemical processes enables accurate interpretation of dissolved ion variations, identification of dominant hydrochemical reactions, and evaluation of spatial and temporal changes in groundwater quality along flow paths (Langmuir, 1997). Groundwater chemistry is influenced by a wide

range of natural and anthropogenic factors, including geological formations, agricultural activities, urban wastewater discharge, and landfill sites (Sridhar and Parimalarenganayaki, 2024; Wdowczyk et al., 2024).

Landfills represent significant potential sources of groundwater contamination because they contain mixtures of municipal, commercial, and industrial wastes that may release leachate into surrounding aquifers. This issue is particularly critical in urban and semi-arid regions where groundwater constitutes a major source of drinking water. Among various contaminants, nitrate has

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108241>

\*Corresponding author: Farshad Alijani; E-mail: [f\\_alijani@sbu.ac.ir](mailto:f_alijani@sbu.ac.ir)

How to cite this article: Kaveh Cholcheh, M., Alijani, F., Nassery, H. R., 2025. Assessment of landfill and municipal wastewater impact on groundwater in the aquifer of Hamzeh city, northeast of Dezful, using the self-organizing map method. Kharazmi Journal of Earth Sciences 11(2), 411- 432. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108241>



BY NC

emerged as one of the most widespread and concerning pollutants due to its direct association with human activities such as wastewater leakage and excessive fertilizer application in agricultural lands.

The assessment of groundwater quality is often challenged by the complexity and multidimensional nature of hydrochemical datasets. Conventional laboratory-based approaches, although reliable, can be time-consuming and costly when applied to large datasets and regional-scale studies (Srivastava and Ramanathan, 2008; Moosavi et al., 2013). Consequently, advanced statistical and data-driven techniques have become essential for reducing data dimensionality, identifying hidden patterns, and improving the interpretation of complex hydrogeochemical processes (Choi et al., 2014).

In recent years, Self-Organizing Maps (SOM), a type of unsupervised artificial neural network introduced by Kohonen (1982), have been widely used for groundwater quality assessment and hydrochemical data analysis. SOM provides effective visualization and clustering capabilities for high-dimensional datasets, facilitating the identification of dominant hydrogeological processes and contamination sources. Previous studies have demonstrated the effectiveness of SOM in classifying groundwater samples, detecting pollution sources, and supporting hydrogeochemical interpretation when integrated with other statistical and geochemical tools (Lee et al., 2019; Soroush and Seifi, 2019; Gholami et al., 2020). Therefore, the integration of SOM with conventional hydrogeochemical methods offers a powerful framework for distinguishing between natural geochemical controls and anthropogenic impacts, ultimately contributing to improved groundwater resource management and sustainable water supply planning.

## Materials and Methods

The study area is located south of Hamzeh city in the northern part of the Khuzestan Province, approximately 15 km east of Dezful, within the Silley–Sarbisheh plain. According to long-term meteorological records (1986–

2016), the region has a semi-arid climate with a mean annual temperature of about 24.2 °C and an average annual precipitation of 346 mm. Geologically, the area belongs to the folded Zagros zone and the Khuzestan Plain and is composed mainly of the Aghajari Formation, the Lahbari Member, Bakhtiari conglomerates, and recent alluvial deposits (O'B Perry and Setudehnia, 1967). The aquifer is unconfined, with alluvial thickness ranging from approximately 160 m in the southern part to more than 200 m in the northern part. Groundwater depth varies from less than 25 m in the western area to more than 75 m in the eastern part, and groundwater generally flows from northeast to southwest.

To evaluate the groundwater hydrochemistry and nitrate contamination, ten exploitation wells with appropriate spatial distribution were selected across the study area. Groundwater sampling was conducted during three periods: January 2018, August 2018, and November 2018, in order to capture seasonal variations. Water samples were collected following standard sampling protocols and analyzed in certified laboratories. Major cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{K}^+$ ), major anions ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , and  $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), electrical conductivity (EC), and pH were measured using standard analytical methods.

Data quality was assessed by calculating the ionic balance error for each sample. Several statistical and hydrogeochemical techniques were applied to identify the controlling processes and pollution sources. Hierarchical Cluster Analysis (HCA) was used to classify groundwater samples based on their hydrochemical similarity, following the approach commonly applied in groundwater studies (Tlili-Zrelli et al., 2012; Zhang et al., 2016). Factor Analysis (FA) with varimax rotation was performed to reduce data dimensionality and to identify the main factors governing groundwater chemistry (Suk and Lee, 1999; Tabachnick and Fidell, 2007).

In addition, Self-Organizing Maps (SOM), an unsupervised artificial neural network introduced by Kohonen (1982), were employed to visualize and cluster high-dimensional hydrochemical data while preserving

their topological structure. The optimal number of output neurons was determined using Kohonen's empirical formula ( $s = 5\sqrt{n}$ ). Saturation indices of relevant minerals were calculated to assess geochemical equilibrium conditions (Langmuir, 1997). Finally, spatial distribution maps, including isochloride and isonitrate maps, were generated using GIS to illustrate groundwater flow patterns and contaminant distribution.

## Results and Discussion

The hydrochemical analysis of groundwater samples collected from the Hamzeh aquifer during three sampling periods revealed noticeable spatial and chemical variations across the study area. The ionic balance error for all samples was within acceptable limits, confirming the reliability of the analytical results. Electrical conductivity (EC) values showed a clear increasing trend from the northern to the southern parts of the aquifer, indicating progressive mineralization along the groundwater flow path. Piper diagram analysis classified groundwater into three main hydrochemical facies, reflecting the influence of lithology and geochemical evolution.

Hierarchical Cluster Analysis (HCA) and Self-Organizing Map (SOM) results consistently classified the groundwater samples into three distinct groups. Group 1, located mainly in the northern part of the study area, exhibited the lowest EC values (around 500  $\mu\text{mhos/cm}$ ) and lower concentrations of dissolved solids. This group was dominated by Ca–Mg– $\text{HCO}_3$  type water, indicating the dissolution of carbonate minerals such as calcite and dolomite. Group 3, predominantly located in the southern part of the aquifer, showed the highest EC values (approximately 1000  $\mu\text{mhos/cm}$ ) and elevated  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  concentrations, suggesting halite dissolution or possible brine influence from the Aghajari Formation and Lahbari Member. Group 2, situated in the central part of the study area, displayed intermediate hydrochemical characteristics, representing a transitional zone between the two end members.

Factor Analysis identified two main controlling factors explaining most of the variance in groundwater

chemistry. The first factor, dominated by  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$ , accounted for the largest proportion of variance and was associated with halite dissolution. The second factor, characterized by  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ , reflected carbonate mineral dissolution processes. Nitrate did not show a strong correlation with major ions or geological factors, indicating an external anthropogenic source.

Spatial distribution maps revealed that nitrate concentrations were highest in the southern part of the study area and increased along the general direction of groundwater flow. Elevated nitrate levels were also observed after the agricultural season, particularly in cultivated areas. These patterns suggest that municipal wastewater is the primary source of nitrate contamination, while agricultural activities act as a secondary contributor. No significant impact of the landfill on groundwater quality was detected based on hydrochemical, statistical, and spatial analyses.

## Conclusions

In this study, by integrating hydrogeochemical methods and multivariate statistical techniques including factor analysis, hierarchical clustering, and self-organizing map, the origin and spatial pattern of nitrate contamination in the aquifer east of Dezful city were investigated. The results showed that the variations in electrical conductivity and the concentrations of sodium and chloride ions increase from the north to the south of the region, and the predominant process affecting the aquifer's salinity is halite dissolution along the groundwater flow path. In contrast, nitrate concentration in different clusters did not show a clear pattern of increase or decrease concurrent with salinity, indicating a different control mechanism for this pollutant compared to natural hydrogeochemical processes.

Factor analysis identified sodium and chloride as the most significant factors influencing groundwater hydrochemistry, and the results of the mineral saturation index also confirmed the role of halite dissolution. SOM clustering classified the samples into three distinct groups with different qualitative characteristics, which corresponded well with the spatial location of the wells

and the hydrogeological conditions of the region. These results indicate that nitrate contamination in the study area is influenced more by anthropogenic sources such as urban wastewater infiltration and surface activities than by natural processes.

Overall, the findings of this study demonstrate the high efficiency of integrating the self-organizing map method with hydrochemical data in identifying the governing processes of groundwater quality and differentiating pollution sources. This approach can serve as an effective tool for monitoring groundwater quality and supporting management decision-making for the supply and protection of drinking water resources in urban and semi-arid regions.

## References

- Choi, B.Y., Yun, S.T., Kim, K.H., Kim, J.W., Kim, H.M., Koh, Y.K., 2014. Hydrogeochemical interpretation of South Korean groundwater monitoring data using self-organizing maps. *Journal of Geochemical Exploration* 137, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.12.001>.
- Gholami, V., Khaleghi, MR., Taghvaye Salimi, E., 2020. Groundwater quality modeling using self-organizing map (SOM) and geographic information system (GIS) on the Caspian southern coasts. *Journal of Mountain Science* 17(7), 1724-1734. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5483-y>.
- Kohonen, T., 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological cybernetics* 43(1), 59-69. <https://doi.org/10.1007/BF00337288>
- Langmuir, D., 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, Upper Saddle River., New Jersey, 601p.
- Lee, K.J., Yun, S.T., Yu, S., Kim, K.H., Lee, J.H., Lee, S.H., 2019. The combined use of self-organizing map technique and fuzzy c-means clustering to evaluate urban groundwater quality in Seoul metropolitan city, South Korea. *Journal of Hydrology* 569, 685-697. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.031>.
- Moosavi, V., Vafakhah, M., Shirmohamadi, B., 2013. A wavelet-ANFIS hybrid model for groundwater level forecasting for different prediction periods. *Water Resources Management* 27, 1301-1321. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0239-2>.
- O'B Perry, J.T., Setudehnia, A., 1967. *Dezful Geological Compilation Map, 1:100 000*. Iranian Oil operating Companies, geological and exploration division., Tehran. <http://csw.ngdir.ir>.
- Soroush, F., Seifi, A., 2019. Application of a self-organizing map for clustering the groundwater quality in Kerman province and assessment its suitability for drinking and irrigation purposes. *Journal of Water and Soil Science* 23(2), 281-302. <https://doi.org/10.29252/jstnar.23.2.281>. (in Persian).
- Sridhar, D., Parimalarenganayaki, S., 2024. A comprehensive review on groundwater contamination due to sewer leakage: sources, detection techniques, health impacts, mitigation methods. *Water, Air & Soil Pollution* 235(1), 56. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06852-1>.
- Srivastava, K.S., Ramanathan, L.A., 2008. Geochemical assessment of groundwater quality in vicinity of Bhalswa landfill, Delhi, India, using graphical and multivariate statistical methods. *Environmental Geology* 53, 1509-1528. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0762-2>.
- Suk, H., Lee, K.K., 1999. Characterization of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: clustering into ground water zones. *Groundwater* 37(3), 358-366. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb01112.x>.
- Tabachnick, B.G., Fidell L., 2007. *Using Multivariate Statistics*, 7th. Ed., Allyn and Bacon., New York, 1076p.
- Tlili-Zrelli, B., Azaza F.H., Gueddari, M., Bouhlila, R., 2012. Geochemistry and quality assessment of groundwater using graphical and multivariate statistical methods, A case study: Grombalia phreatic aquifer (Northeastern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences* 6, 3545-3561. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0617-3>.
- Wdowczyk, A., Szymańska-Pulikowska, A., Gupta, A., 2024. Application of selected indicators to assess contamination of municipal landfill leachate and its impact on groundwater. *Water Resources and Industry* 32, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100265>.
- Zhang, B., Li G., Cheng, P., Yeh, T.C., Hong, M., 2016. Landfill risk assessment on groundwater based on vulnerability and pollution index. *Water Resources Management* 30(4), 1465-1480. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1233-x>.

CRediT authorship contribution statement



**Mohammad Kaveh Cholchek**

Methodology, Software, Formal analysis  
Investigation, Writing - Original Draft  
Writing - Review & Editing,



**Farshad Alijani**

Conceptualization, Methodology  
Software, Validation, Formal analysis  
Investigation, Writing - Original Draft  
Writing - Review & Editing, Supervision  
Project administration, Funding acquisition



**Hamid Reza Nassery**

Conceptualization, Methodology, Software  
Validation, Formal analysis, Investigation  
Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing  
Supervision, Project administration,  
Funding acquisition



مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

مجله علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

## ارزیابی تأثیر لندفیل و فاضلاب شهری بر آب‌های زیرزمینی آبخوان شهر حمزه، شمال شرق دزفول، با روش نگاشت خودسازمان‌ده

محمد کاوه چلچله<sup>۱</sup>، فرشاد علی جانی<sup>۲\*</sup>، حمیدرضا ناصری<sup>۳</sup>

۱، ۲، ۳. گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴	شهر حمزه در شرق شهر دزفول در سال‌های اخیر با مشکل آلوده شدن چاه‌های آب شرب به نیترات شهری روبرو شده و منشأ لندفیل و فاضلاب به‌عنوان منشأ احتمالی این آلودگی مطرح شده‌اند. به منظور مطالعه منشأ نیترات و تأثیر عوامل زمین‌شناسی، از ۱۰ حلقه چاه بهره‌برداری در دی‌ماه ۱۳۹۶، مرداد و آبان‌ماه ۱۳۹۷ نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها برای تعیین غلظت یون‌های اصلی و نیترات آنالیز شدند. تحلیل آماری، تحلیل عاملی، شاخص اشباع، نمودار پایپر و نقشه‌های هم‌ارزش هدایت الکتریکی و کلر، انحلال‌هالیت را به‌عنوان مهم‌ترین عامل زمین‌شناسی تأثیرگذار بر هیدروشیمی آب زیرزمینی شناسایی کردند. بر اساس خوشه‌بندی سلسه‌مراتبی و نگاشت خودسازمان‌ده، نمونه‌ها به سه گروه تقسیم شدند، گروه اول در شمال منطقه مورد مطالعه دارای کم‌ترین مقادیر EC (حدود ۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) و مواد محلول است، گروه سوم در جنوب منطقه دارای بیش‌ترین مقادیر EC (حدود ۱۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر) و مواد محلول است. گروه دوم در میانه منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر حد واسط دو گروه دیگر است. افزایش هدایت الکتریکی از گروه ۱ به ۳ ناشی از انحلال‌هالیت موجود در سازند آغاچاری و لهری است. در تحلیل‌های قبل نیترات ارتباطی با سایر متغیرها نشان نداد. بر اساس نقشه‌های هم‌نیترات بالاترین غلظت نیترات در جنوب شهر و در جهت جریان آب زیرزمینی مشاهده شد. همچنین در انتهای فصل کشاورزی غلظت بالای نیترات در مناطق کشاورزی مشاهده می‌شود. بنابراین فاضلاب شهری عامل اصلی و کشاورزی عامل فرعی آلودگی نیترات در منطقه مورد مطالعه است. اثر قابل توجهی از تأثیر لندفیل بر کیفیت آبخوان مشاهده نشد. نتایج این پژوهش کارایی روش SOM در خوشه‌بندی و شناسایی عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی را نشان داد.
واژه‌های کلیدی آلودگی آب زیرزمینی، لندفیل، هیدروشیمی، نگاشت خودسازمان‌ده، شهر حمزه.	



### مقدمه

کیفی آب ارائه می‌کند (Langmuir, 1997). کیفیت آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر طیف وسیعی از فرآیندهای طبیعی و انسان‌زاد قرار می‌گیرد. از جمله می‌توان به ساختار زمین‌شناختی، فعالیت‌های کشاورزی، فاضلاب مناطق مسکونی و همچنین محل‌های دفن پسماند اشاره نمود (Sridhar and Parimalarenganayaki, 2024; Wdowczyk et al., 2024; Tafazoli et al., 2025). لندفیل که حاوی ترکیبی از ضایعات مسکونی، تجاری و صنعتی می‌باشند، منبع انتشار طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها در محیط‌زیست، به‌ویژه آبخوان محسوب

تحلیل هیدروژئوشیمیایی، هسته مرکزی ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی در یک آبخوان را تشکیل می‌دهد. این شاخه از هیدروژئولوژی به مطالعه تعاملات شیمیایی بین فازهای آب، سنگ و گاز در محیط‌های زیرسطحی می‌پردازد. درک این فرآیندهای ژئوشیمیایی، این امکان را فراهم می‌سازد تا تغییرات غلظت عناصر محلول در آب زیرزمینی در امتداد مسیرهای جریان، ردیابی و تفسیر شود. در نهایت، این بینش، توصیف دقیق‌تری از الگوهای تغییرپذیری مکانی و زمانی پارامترهای

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108241>\*نویسنده مسئول: فرشاد علیجانی [f\\_alijani@sbu.ac.ir](mailto:f_alijani@sbu.ac.ir)

استناد به این مقاله: کاوه چلچله، م. علیجانی، ف. ناصری، ح. ر. (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیر لندفیل و فاضلاب شهری بر آب‌های زیرزمینی آبخوان شهر حمزه، شمال شرق دزفول، با روش نگاشت خودسازمان‌ده. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه ۴۱۱ تا ۴۳۲. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108241>



به خوبی فرآیندهای هیدروژئولوژیک حاکم بر آبخوان را شبیه‌سازی نماید. در پژوهش انجام شده توسط سروش و سیفی (Soroush and Seifi, 2019)، به منظور طبقه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی استان کرمان و تعیین قابلیت بهره‌برداری از این منابع برای مصارف شرب و کشاورزی، از روش نگاشت خودسازمان‌ده استفاده کردند. در این مطالعه، منابع آبی منطقه به چهار دسته متمایز تقسیم شدند. روند تغییرات هدایت الکتریکی نشان داد که این پارامتر از گروه اول به گروه‌های چهارم، سوم و دوم از شدت بیشتری برخوردار می‌گردد. همچنین محققان به این نتیجه دست یافتند که روش نگاشت خودسازمان‌ده می‌تواند به صورت موفقیت‌آمیزی برای طبقه‌بندی و توصیف ویژگی‌های کیفیت آب‌های زیرزمینی به کار رود. غلامی و همکاران (Gholami et al., 2020) کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان ساحلی دریای خزر با به‌کارگیری تلفیقی از روش نگاشت خودسازمان‌ده و سامانه اطلاعات جغرافیایی و با استفاده از شاخص GWGI مورد ارزیابی قرار دادند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که اگرچه بیشتر بخش‌های آبخوان از کیفیت مطلوبی برای مصارف شرب برخوردارند، اما این منابع کاملاً عاری از آلودگی نیستند. در نتیجه، حفاظت و مدیریت بهینه آبخوان‌های منطقه امری ضروری تشخیص داده شد. همچنین نتایج پژوهش مؤید آن بود که کاربرد همزمان روش نگاشت خودسازمان‌ده و GIS موجب افزایش کارایی و دقت ارزیابی‌ها می‌گردد. گائو و همکاران (Gao et al., 2024) برای ردیابی آلودگی نیترات از پارامترهای هیدروشیمی، نقشه خودسازمان‌ده و ایزوتوپ‌های اکسیژن و نیتروژن در آبخوان حوضه رودخانه شا (Sha) در جنوب غربی استان هنان (Henan) چین استفاده کردند. نتایج نشان داد که نیتروژن استفاده شده در بخش کشاورزی به عنوان عامل اصلی آلودگی آب زیرزمینی در گستره مورد مطالعه است. جعفری و همکاران (Jafari et al., 2025) با هدف شناسایی منابع شوری و تعیین رژیم هیدروژئولوژیکی در معدن گل‌گهر، از روش نوین نقشه خودسازمان‌ده در کنار تحلیل‌های هیدروشیمیایی و ایزوتوپ‌های پایدار استفاده کردند. نتایج، چهار خوشه مجزا را آشکار کرد که فرآیند غالب شوری‌زایی،

می‌شوند. نشت این مواد آلاینده به منابع آبی، می‌تواند پیامدهای زیان‌بار و غیرقابل جبرانی را برای سلامت انسان به دنبال داشته باشد (Azari et al., 2023; Fida et al., 2024; Shakeri et al., 2025). علاوه بر این، چاه‌های جذبی فاضلاب‌های شهری نیز از مهم‌ترین منشأهای آلودگی آبخوان به‌ویژه افزایش نیترات در آب‌های زیرزمینی هستند (Mor et al., 2018; Mester et al., 2024). فرآیند پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی منجر به تولید حجم گسترده‌ای از داده‌های کمی و کیفی می‌شود. با توجه به تنوع بالای این متغیرها و همچنین وجود ابهام در تشریح فرآیندهای انتقال و تعاملات شیمیایی درون سامانه آبخوان، استفاده از روش‌های پیشرفته برای استخراج، درک، پردازش و نمایش بصری این مجموعه داده‌های پیچیده و چندبعدی ضروری می‌باشد (Srivastava and Ramanathan, 2008). بیشتر بررسی‌های کیفیت آب، آزمایشگاهی است که نیازمند صرف هزینه‌های زمانی و مالی هستند. از این رو مدل‌ها برای بررسی و پیش‌بینی کیفیت آب مورد استفاده قرار می‌گیرند تا در هزینه و زمان تحلیل و بررسی صرفه‌جویی شود (Moosavi et al., 2013). مدیریت و تحلیل مجموعه داده‌های کیفیت آب‌های زیرزمینی در مقیاس ملی و منطقه‌ای به دلیل حجم انبوه اطلاعات، فرآیندی پیچیده و زمان‌بر محسوب می‌شود. در این زمینه، فشرده‌سازی ابعاد داده‌ها به فضایی با ابعاد کمتر، به طوری که حداقل کاهش در اطلاعات مفید را به همراه داشته باشد، اقدامی ضروری است. این کاهش ابعاد می‌تواند منجر به شناسایی الگوها و ساختارهای پنهان در داده‌های پیچیده هیدروشیمیایی گردد (Choi et al., 2014).

لی و همکاران (Lee et al., 2019) در یک مطالعه جهت ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی شهر سنول، از تکنیک‌های نقشه‌های خودسازمان‌ده (SOM) و خوشه‌بندی فازی C-Means استفاده کردند. در این پژوهش، منابع آب منطقه مورد مطالعه در سه دسته مجزا طبقه‌بندی گردید و نتایج حاکی از آن بود که فاضلاب شهری عامل اصلی آلودگی محسوب می‌شود. همچنین یافته‌های تحقیق نشان داد که تلفیق روش نقشه‌های خودسازمان‌ده با خوشه‌بندی فازی قادر است

زیرزمینی زمین‌شناسی، لندفیل، فاضلاب شهری و فعالیت‌های کشاورزی هستند. به منظور بررسی توزیع مکانی متغیرها از نقشه‌های هم‌ارزش و برای بررسی عوامل تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی و منشأ نیترات در آب زیرزمینی از خوشه‌بندی سلسله مراتبی، تحلیل عاملی و نگاشت خودسازمان‌ده استفاده شد. از تحلیل عاملی برای تعیین فرآیندهای مهم موجود در آبخوان و از خوشه‌بندی و نقشه خودسازمان‌ده برای خوشه‌بندی نمونه‌ها و تعیین منشأ نیترات استفاده شده است. نقشه خودسازمان‌ده روش نوینی برای خوشه‌بندی داده‌های چندبعدي است. این روش داده‌های چندبعدي را با حفظ ساختار به داده‌های دوبعدي تبدیل می‌کند. این ویژگی برای تحلیل نتایج آب زیرزمینی که دارای متغیرهای مختلفی هستند بسیار مناسب است.

## مواد و روش‌ها

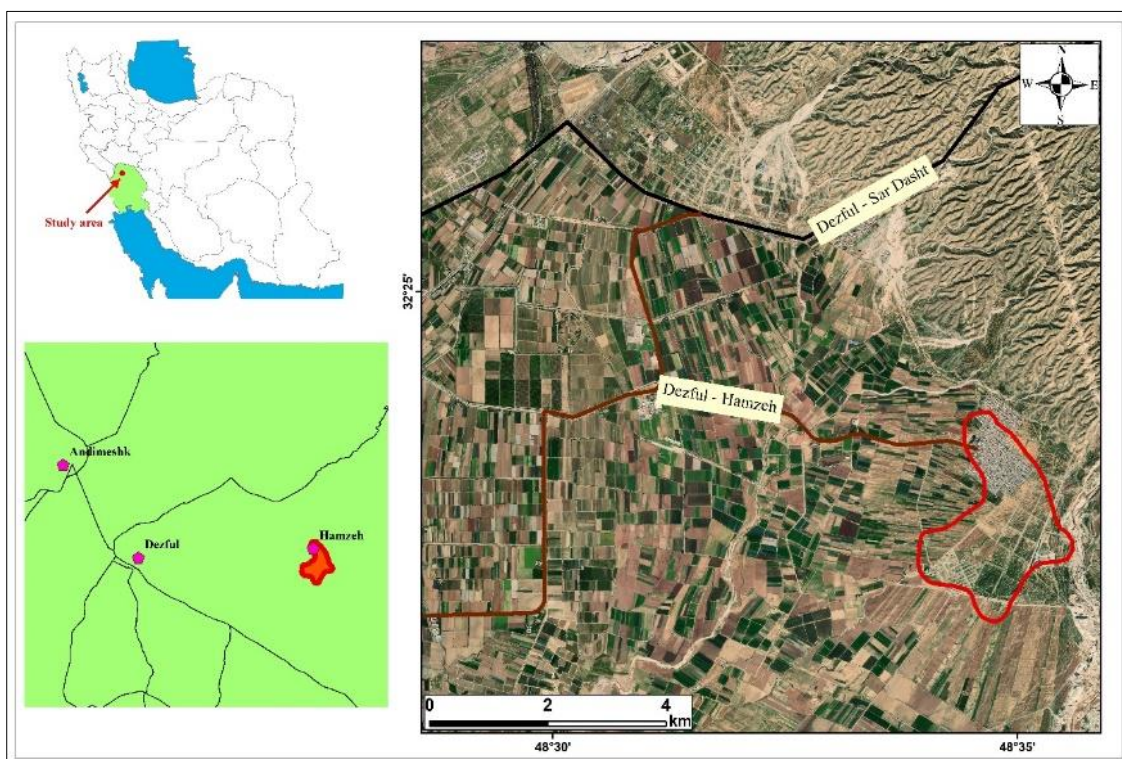
### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب شهر حمزه (شمال خوزستان) در ۱۵ کیلومتری شرق شهر دزفول واقع شده است. دسترسی به این منطقه از طریق جاده دزفول به سردشت و جاده دزفول به شوشتر امکان‌پذیر است (شکل ۱). این منطقه بخشی از دشت سبیلی - سربیشه است. بر اساس داده‌های هواشناسی دوره ۲۹ ساله (۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵)، میانگین دمای سالانه و بارش این دشت به ترتیب ۲۴/۲ درجه سانتی‌گراد و ۳۴۶ میلی‌متر است.

انحلال هالیت و وجود یک رابطه هیدرولیکی بین کفه نمکی و گودال معدن را نشان داد. نتایج اثربخشی روش نقشه خودسازمان‌ده را به عنوان یک ابزار قدرتمند در درک فرآیندهای هیدروشیمیایی پیچیده محیط‌های معدنی را تأیید نمود.

نگاشت‌های خودسازمان‌دهنده یک روش تجسم داده است که توسط کوهنن (Kohonen, 1982) ارائه شده است. در این روش ابعاد داده‌ها را با استفاده از شبکه عصبی خودسازمان‌ده کاهش می‌دهند. هدف اصلی این تکنیک کاهش ابعاد داده‌ها به یک یا دو بعد است. در شبکه‌ی خودسازمان‌ده، از روش یادگیری رقابتی برای آموزش استفاده می‌شود. نگاشت خودسازمان‌ده نوعی شبکه عصبی غیرنظارتی است که برای بصری کردن و تفسیر داده‌های خطی و غیرخطی بعد بالا (High-Dimensional Datasets) کاربرد دارد. در سال‌های اخیر استفاده از این روش برای طبقه‌بندی، تعیین منشأ مواد محلول و جریان آب زیرزمینی افزایش یافته است (Singha et al., 2025; Tian et al., 2025).

شهر حمزه در سال‌های اخیر با مشکل کاهش کیفیت آب زیرزمینی و آلوده شدن چاه‌های آب شرب به نیترات روبرو شده است. به علت وجود لندفیل در مجاورت شهر و همچنین نبود سیستم جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب در شهر همچنین دانه‌درشت بودن رسوبات در این منطقه، احتمال نشت نیترات از این دو منبع وجود دارد. در این پژوهش تأثیر عوامل مختلف بر کاهش کیفیت آب زیرزمینی بررسی شده است. در منطقه مورد مطالعه مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت آب

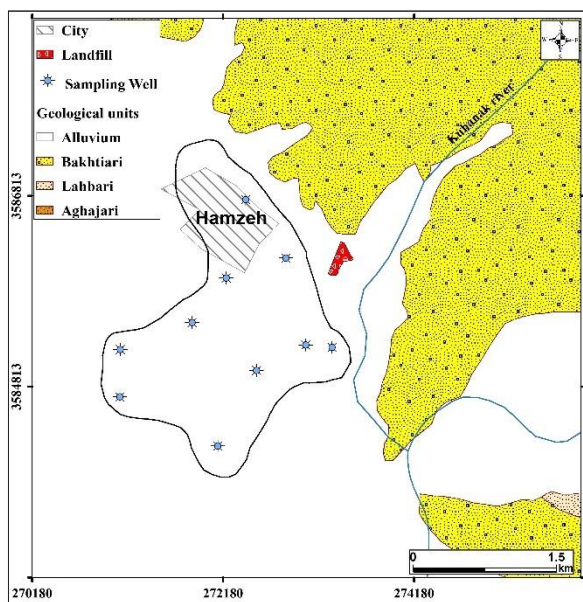


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Geographical location and access road to the study area  
 رگه‌های گچ و نمک، مارن‌های قرمز و سیلتستون) و بخش لهبری آن  
 (سیلتستون‌های هوازده نرم و گچ‌دار همراه با لایه‌های مارن و  
 ماسه‌سنگ و گچ)، کنگلومرای بختیاری (قلوه‌سنگ‌های آهکی و چرت-  
 های محلی که دارای سیمانی از آهک و گاهی سیلیس هستند) و آبرفت  
 عهد حاضر (قلوه، شن و ماسه) تشکیل شده است (شکل ۲).

### زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

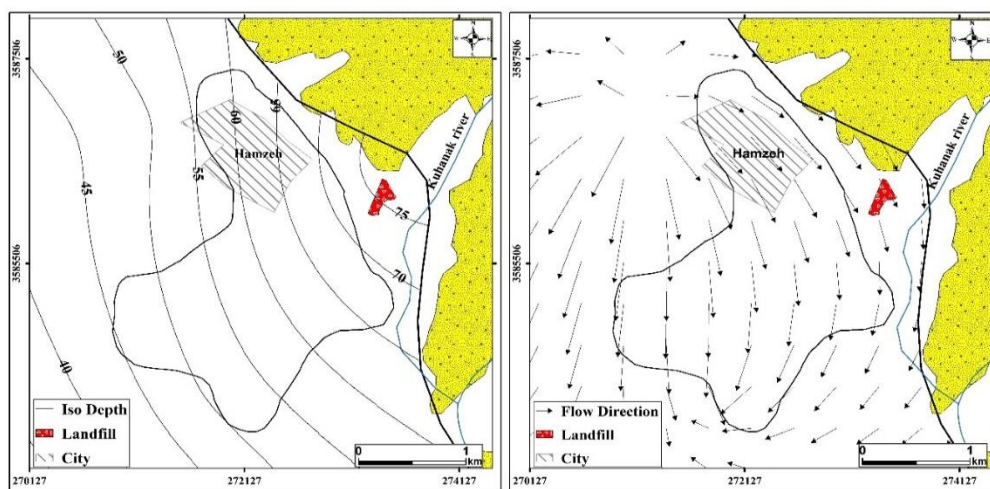
از نظر زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه بخشی از زاگرس  
 چین‌خورده و بخشی از دشت خوزستان را شامل می‌شود. زمین‌شناسی  
 منطقه، نهشته‌های سنوزوئیک تا عهد حاضر را شامل می‌شود که عمدتاً  
 از سازندهای آجاجاری (ماسه‌سنگ‌های آهک‌دار قهوه‌ای - خاکستری،



شکل ۲- واحدهای زمین‌شناسی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری از آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (O'B Perry and Setudehnia, 1967)  
 Fig. 2. Geological units and location of groundwater sampling points in the study area (O'B Perry and Setudehnia, 1967)

مطالعه که عمدتاً شامل شن و قلوه‌سنگ هستند، دارای جورشدهگی متوسط تا خوب می‌باشند. عمق آب زیرزمینی از بیش‌تر از ۷۵ متر در شرق تا کم‌تر از ۲۵ متر در غرب منطقه مورد مطالعه متغیر و جهت آب زیرزمینی شمالی - جنوبی است (شکل ۳). در آبان ماه سال ۹۷ تراز آب زیرزمینی از بیش از ۱۲۶ متر در شمال تا کمتر از ۱۱۴ متر در جنوب منطقه مطالعه متغیر است.

بر اساس اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیک، لاگ حفاری چاه‌ها، داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای و اطلاعات زمین‌شناسی، آبخوان منطقه مورد مطالعه از نوع آزاد است. نتایج ژئوالکتریک یک لایه شنی متراکم در سطح بر روی آبخوان شنی و سنگ کف مادستونی (احتمالاً آغاچاری) را نشان می‌دهد. ضخامت آبرفت از جنوب به سمت شمال از ۱۶۰ تا بیش از ۲۰۰ متر تغییر می‌کند. رسوبات درشت‌دانه منطقه مورد



شکل ۳- نقشه‌های (a) جهت جریان و (b) هم عمق آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، آبان‌ماه ۱۳۹۷  
 Fig. 3. Maps of a) Groundwater flow direction and b) Groundwater isodepth for the study area, November 2018

## داده‌های مورد استفاده

علاوه بر جمع‌آوری اطلاعات قبلی منابع آب و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰.۰۰۰، برای بررسی هیدروشیمی منطقه، از ۱۰ حلقه چاه بهره‌برداری با توزیع مکانی مناسب، در سه دوره دی‌ماه ۱۳۹۶، مرداد (۹ نمونه) و آبان ماه ۱۳۹۷ نمونه‌برداری انجام شد. موقعیت نمونه‌ی شماره ۱۰ در دی‌ماه ۱۳۹۶ و آبان‌ماه ۱۳۹۷ متفاوت است. سنجش نمونه‌های دی‌ماه ۱۳۹۶ و مرداد ماه ۱۳۹۷ توسط آزمایشگاه فناوری اندیشه گستر کامیار و نمونه‌های آبان ماه ۱۳۹۷ توسط آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان براساس دستورالعمل آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان انجام شد. پارامترهای pH و EC توسط دستگاه‌های پرتابل در محل اندازه‌گیری شدند. یون‌های کلسیم، منیزیم، کلرید، کربنات و بی‌کربنات به روش تیتراسیون، سدیم و پتاسیم به روش شعله سنجی و سولفات و نیترات به روش اسپکتروفتومتری مورد سنجش قرار گرفتند.

## روش‌شناسی

روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی به عنوان یک تکنیک کارآمد برای دسته‌بندی مجموعه‌های آماری همگن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرآیند، داده‌هایی که در یک دسته قرار می‌گیرند، دارای بالاترین سطح تشابه و همگنی با یکدیگر می‌باشند (Tlili-Zrelli et al., 2012). روش‌های خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی از جمله تکنیک‌های تحلیلی هستند که کارایی مطلوبی در پردازش داده‌های هیدروشیمی از خود نشان می‌دهند. این روش‌ها دارای قابلیت مناسبی برای ارزیابی پارامترهای کیفی آب بوده و امکان دسته‌بندی کیفی نمونه‌ها را بر اساس تشابه ویژگی‌هایشان فراهم می‌سازند (Zhang et al., 2016). در روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، پیش از انجام تحلیل، ابتدا می‌بایست یک مقیاس کمی بر اساس میزان همگونی و تشابه بین داده‌ها تعیین گردد. انتخاب این شاخص‌های کمی (شامل مقیاس فاصله و تشابه) با در نظر گرفتن عواملی همچون الگوریتم تشکیل خوشه‌ها،

ماهیت فضایی داده‌ها، نوع متغیرهای موجود و مقیاس اندازه‌گیری آن‌ها صورت می‌پذیرد. خروجی این فرآیند، تولید یک نمودار درختی (دندروگرام) است که در آن نمونه‌های مشابه با فاصله‌های کوتاه‌تر به یکدیگر مرتبط می‌شوند. در این نمایش، فاصله‌های کوتاه‌تر بیان‌گر تشابه بیشتر بین مشاهدات بوده، در حالی که فاصله‌های طولانی‌تر نشان‌دهنده کاهش میزان شباهت بین آن‌ها می‌باشد (Moghimi, 2017). نمونه‌های هر دوره با استفاده از ابزار Cluster Observation در نرم‌افزار Minitab خوشه‌بندی شدند. پیچیدگی ذاتی فرآیندهای زمین‌شناختی و هیدروژئولوژیکی به‌طور معمول در توزیع ناهمگون داده‌های اندازه‌گیری شده تبلور می‌یابد. اندازه‌گیری‌های مکانی-زمانی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی عمدتاً قادر به تفسیر و آشکارسازی واضح مکانیسم‌های اصلی حاکم بر سیستم نیستند. در این زمینه، روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) به عنوان یک راهکار تحلیلی کارآمد، امکان استخراج فرآیندهای کلیدی و تبیین تغییرپذیری موجود بین متغیرهای مشاهده‌شده را از طریق تقلیل آن‌ها به تعداد محدودی عامل نهفته فراهم می‌سازد (Tabachnick and Fidell, 2007). روش تحلیل عاملی با به کارگیری چرخش واریماکس، تأثیر متغیرهای کم‌اهمیت در ماتریس بارهای عاملی را کاهش می‌دهد. در این فرآیند، چرخش واریماکس به طور مشخص برای تفکیک متغیرهایی با بارهای عاملی بالا (مقادیر نزدیک به +۱ یا -۱) از متغیرهای با بار عاملی پایین (مقادیر نزدیک به صفر) به کار گرفته می‌شود. این روش بر پایه مجموعه‌ای از اصول و قواعد مشخص پایه‌گذاری شده است. چرخش مذکور منجر به ایجاد متغیرهای جدیدی تحت عنوان "عامل" می‌گردد که این عوامل، روابط بین متغیرهای مختلف و درجه اهمیت هر یک را مشخص نموده و از این طریق امکان شناسایی پارامترهای مؤثر در فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی را فراهم می‌سازند (Suk and Lee, 1999). در سال‌های اخیر، شبکه خودسازمان‌ده به عنوان یک روش تحلیلی پیشرفته، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های حوزه منابع آب، به‌ویژه در زمینه پایش و ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی و سطحی پیدا کرده

نگاشت خودسازمان‌ده با بهره‌گیری از توابع استاندارد موجود در تولباکس شبکه‌های عصبی متلب انجام پذیرفت. همچنین تحلیل عاملی با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. به صورت کلی نتایج آنالیز با استفاده از شاخص‌های آماری، نقشه‌های هم‌ارزش (هدایت الکتریکی، کلر و نیترات، نمودار پایپر، نگاشت خودسازمان‌ده، تحلیل عاملی و شاخص اشباع، تأثیر عوامل مختلف بر آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است.

### نتایج و بحث

به منظور بررسی صحت نتایج سنجش برای کلیه نمونه‌ها خطای تعادل یونی محاسبه شد. در دوره نمونه‌برداری دی‌ماه ۱۳۹۶ میانگین pH برابر ۷/۴ و میانگین هدایت الکتریکی ۸۸۷/۵ میکروموس بر سانتی‌متر است. با توجه به مقادیر میانه (۸۸۰) و ضریب تغییرات (۴۱/۳)، توزیع هدایت الکتریکی به حالت نرمال نزدیک است و پراکندگی مناسبی اطراف میانگین دارند. سدیم و کلسیم به ترتیب با ۹/۸ و ۲/۳ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان کاتیون‌ها و کلر و بی‌کربنات با ۹/۸ و ۳/۴ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان آنیون‌ها، بیش‌ترین حداکثر غلظت را دارند. سدیم و کلسیم به ترتیب با ۴/۷ و ۱/۹ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان کاتیون‌ها و کلر و بی‌کربنات با ۵/۵ و ۳/۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان آنیون‌ها، بیش‌ترین میانگین غلظت را دارند. رابطه مقادیر میانه و ضریب تغییرات با میانگین برای سدیم و کلر مشابه هدایت الکتریکی است و نشان دهنده ارتباط بیش‌تر میان این متغیرها و انحلال‌هالیت است (جدول ۱).

است. کاربرد موفقیت‌آمیز این تکنیک در پردازش داده‌های پیچیده هیدروشیمیایی و شناسایی الگوهای پنهان کیفی، موجب شده است که این روش به یکی از ابزارهای استاندارد در مطالعات آب‌شناسی تبدیل گردد (Choi et al., 2014). نگاشت خودسازمان‌ده به عنوان یک روش تحلیلی مدرن در تفکیک و طبقه‌بندی داده‌های هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی کاربرد دارد. ساختار این شبکه از دو لایه اصلی تشکیل شده است: لایه ورودی و لایه خروجی (متشکل از نورون‌ها). در این معماری، هر نورون موجود در لایه ورودی از طریق بردار وزنی قابل تنظیم و پارامترهای اختصاصی شبکه، با نورون‌های مربوطه در لایه خروجی در ارتباط قرار می‌گیرد (Wang et al., 2015). به طور کلی، این الگوریتم با تحلیل ویژگی‌های مجموعه داده‌های ورودی، نمونه‌ها و الگوهای موجود را در دسته‌بندی‌های همگن گروه‌بندی می‌نماید. این فرآیند با تخصیص خودکار داده‌های مشابه به خوشه‌های مجزا، امکان شناسایی الگوهای پیچیده و روابط پنهان بین متغیرها را فراهم می‌سازد. در این روش، هر خوشه نمایان‌گر گروهی از نمونه‌ها با مشخصات و ویژگی‌های مشترک می‌باشد (Shang et al., 2024). الگوریتم مذکور از قابلیت حفظ ساختار مجاورتی و همچنین تجزیه و تحلیل فضای ورودی منطبق با پراکندگی داده‌ها برخوردار می‌باشد (Kohonen, 1982). برای تعیین تعداد نورون‌های خروجی روش‌های مختلفی توصیه شده است. کوهنن (Kohonen, 1982) پیشنهاد داده است برای تعیین تعداد نورون‌های از رابطه  $s = 5\sqrt{n}$  که n تعداد نمونه‌ها و s تعداد گره خروجی می‌باشند، استفاده شود. برای انجام نگاشت خودسازمان‌ده از آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)، هدایت الکتریکی و pH استفاده شده است. پیاده‌سازی و آموزش مدل

جدول ۱- شاخص‌های آماری مؤلفه‌های شیمیایی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (دی‌ماه ۱۳۹۶)

Table 1. Statistical characteristics of the chemical components of groundwater in the study area (January 2018)

	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	CL	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
		µmho/cm	meq/l							mg/l
Maximum	7.4	1550	2.3	1.8	9.8	0.07	3.4	9.8	1.4	46.4
Average	7.2	887.5	1.9	1.5	4.7	0.04	3.1	5.5	0.6	28.4
Minimum	7.1	440	1.5	1.07	1.0	0.03	2.7	1	0.2	19.8
Median	7.3	880	1.9	1.5	4.5	0.04	3.1	3.9	0.7	27.4
Coefficient of Variation	1.2	41.3	14.7	17.9	70.4	29.5	5.2	70.0	60.0	26.7

بر لیتر در میان آنیون‌ها، حداکثر غلظت را دارند. سدیم و کلسیم به ترتیب با ۴/۷ و ۱/۹ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان کاتیون‌ها و کلر و بی‌کربنات با ۵ و ۲/۳ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان آنیون‌ها بیش‌ترین میانگین غلظت را دارند. رابطه مقادیر میانه و ضریب تغییرات با میانگین برای سدیم و کلر مشابه هدایت الکتریکی است و نشان دهنده ارتباط بیش‌تر میان این متغیرها و انحلال‌هالیت است (جدول ۲).

در دوره نمونه‌برداری مردادماه ۱۳۹۷ میانگین pH برابر ۷/۹ و میانگین هدایت الکتریکی ۸۷۵/۵ میکروموهس بر سانتی‌متر است. با توجه به مقادیر میانه (۸۲۶) و ضریب تغییرات (۴۰/۷)، توزیع هدایت الکتریکی به حالت نرمال نزدیک است و پراکندگی مناسبی اطراف میانگین دارند. سدیم و کلسیم به ترتیب با ۹/۸ و ۲/۴ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان کاتیون‌ها و کلر و بی‌کربنات با ۹/۸ و ۲/۶ میلی‌اکی‌والان

جدول ۲- شاخص‌های آماری مؤلفه‌های شیمیایی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (مردادماه ۱۳۹۷)

Table 2. Statistical characteristics of the chemical components of groundwater in the study area (August 2018)

	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
		µmho/cm	meq/l							mg/l
Maximum	7.9	1500	2.4	1.9	9.8	0.08	2.6	9.8	1.4	70.2
Average	7.4	875.5	1.9	1.6	5.0	0.03	2.3	5.0	0.6	46.0
Minimum	6.7	403	1.5	1.0	0.9	0.01	2.1	1.0	0.1	30.4
Median	7.5	826	2.0	1.6	5.4	0.03	2.3	5.2	0.5	39.5
Coefficient of Variation	5.5	40.7	15.4	15.9	63.1	72.8	6.8	62.4	62.0	29.7

کلسیم به ترتیب با ۵/۴ و ۲/۰ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان کاتیون‌ها و کلر و بی‌کربنات با ۵ و ۳/۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان آنیون‌ها بیش‌ترین میانگین غلظت را دارند. رابطه مقادیر میانه و ضریب تغییرات با میانگین برای سدیم و کلر مشابه هدایت الکتریکی است و نشان دهنده ارتباط بیش‌تر میان این متغیرها و انحلال‌هالیت است (جدول ۳).

در دوره نمونه‌برداری آبان‌ماه ۱۳۹۷ میانگین pH برابر ۸/۱۰ و میانگین هدایت الکتریکی ۹۲۸/۹ میکروموهس بر سانتی‌متر است. با توجه به مقادیر میانه (۹۳۴/۵) و ضریب تغییرات (۴۰/۷)، توزیع هدایت الکتریکی به حالت نرمال نزدیک است و پراکندگی مناسبی اطراف میانگین دارند. سدیم و کلسیم به ترتیب با ۹/۹ و ۲/۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان کاتیون‌ها و کلر و بی‌کربنات با ۹/۷ و ۳/۴ میلی‌اکی‌والان بر لیتر در میان آنیون‌ها، بیش‌ترین حداکثر غلظت را دارند. سدیم و

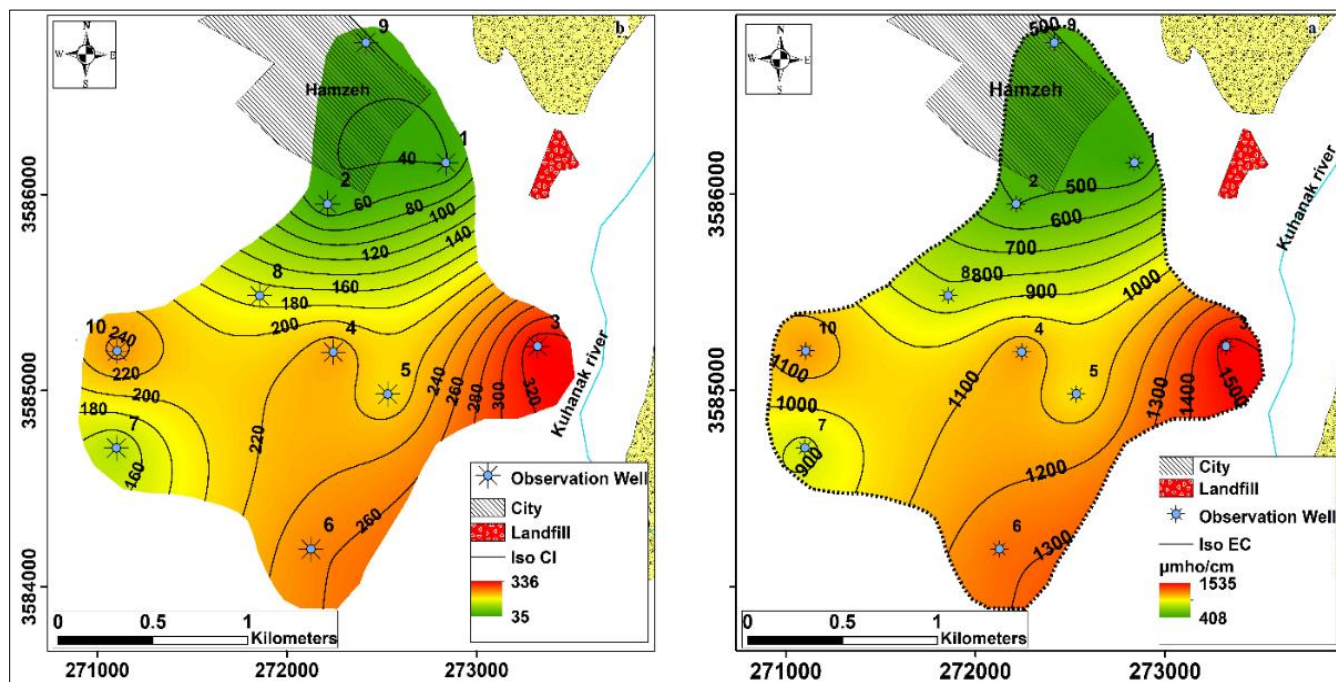
جدول ۳- شاخص‌های آماری مؤلفه‌های شیمیایی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (آبان‌ماه ۱۳۹۷)

Table 3. Statistical characteristics of the chemical components of groundwater in the study area (November 2018)

	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
		µmho/cm	meq/l							mg/l
Maximum	8.1	1536	2.8	1.8	9.9	0.50	3.4	9.7	1.4	53.8
Average	7.7	928.9	2.0	1.5	5.4	0.09	3.1	5.0	0.7	13.9
Minimum	7.4	408	1.5	1.0	0.9	0.03	2.6	1.1	0.0	21.3
Median	7.7	934.5	2.0	1.5	5.6	0.05	3.1	5.3	0.6	39.8
Coefficient of Variation	2.3	40.7	18.8	17.0	61.4	162.6	7.2	71.7	59.1	54.7

افزایش EC و کلر با مسافت طی شده در آبخوان در جهت جریان بیانگر آن است که رخداد این افزایش ناهنجار در ارتباط با تغییرات لیتولوژی در آبرفت یا منشأهای تغذیه زیرزمینی می‌باشد. نقشه هم‌کلر منطقه همخوانی کاملی با هدایت الکتریکی دارد که نشان دهنده افزایش هدایت الکتریکی و غلظت به وسیله انحلال هالیت رخ داده است.

مقدار هدایت الکتریکی از کم‌تر از ۵۰۰ میکرومومس بر سانتی‌متر از شمال منطقه مورد مطالعه به بیش از ۱۳۰۰ میکرومومس بر سانتی‌متر در جنوب منطقه مورد مطالعه می‌رسد. نقشه پراکندگی غلظت کلر الگویی مشابه EC دارد. غلظت کلر از ۳۵ میلی‌گرم در شمال منطقه به ۳۳۶ میلی‌گرم در جنوب منطقه متغیر است (شکل ۴).

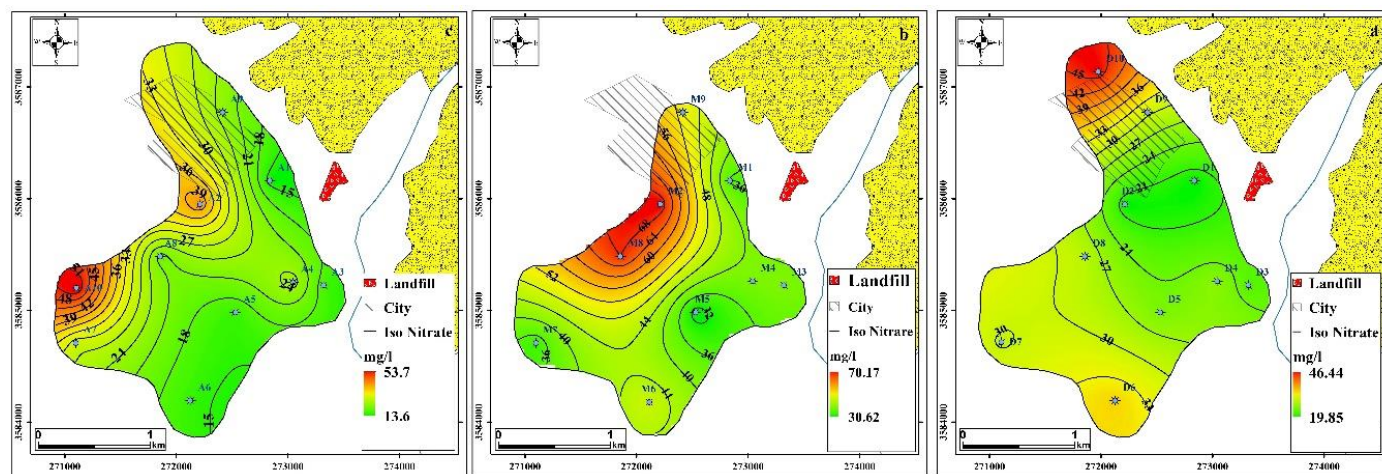


شکل ۴- نقشه‌های (a) هدایت الکتریکی و (b) هم‌کلر منطقه مورد مطالعه، آبان‌ماه ۱۳۹۷

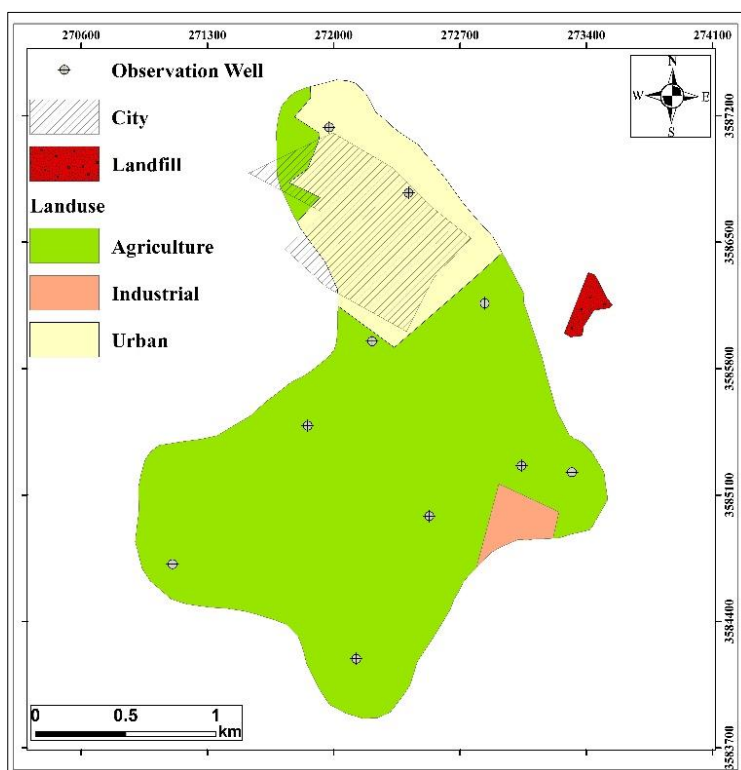
Fig. 4. Maps of a) Groundwater flow electrical conductivity and, b) isochlorine of the study area, November 2018

۱۳۹۷ به علت قرار داشتن در فصل خشک، تأثیر رقیق‌سازی ناشی از نفوذ وجود نداشته و آلودگی تأثیر بیشتری بر هیدروشیمی آبخوان داشته است. در آبان‌ماه ۱۳۹۷، در بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه، غلظت بالای نیترات مشاهده شد که با توجه به پایان فصل فعالیت‌های کشاورزی، می‌تواند ناشی از این فعالیت‌ها باشد (شکل ۶). عدم مشاهده غلظت بالا در پایین‌دست لندفیل در جهت جریان، نشان دهنده تأثیر کم لندفیل بر غلظت نیترات در آبخوان است (شکل ۵).

غلظت نیترات در منطقه مورد مطالعه در هر سه دوره نمونه‌برداری آنومالی مثبت نیترات را در گستره جنوب شهر حمزه نشان می‌دهد (شکل ۵). حداکثر غلظت نیترات در جنوب شهر حمزه به ترتیب دوره نمونه‌برداری برابر با ۴۶/۴، ۷۰/۱ و ۵۳/۷ میلی‌گرم بر لیتر است. در هر سه دوره نمونه‌برداری غلظت بالای نیترات در گستره شهر حمزه مشاهده می‌شود. وجود آلودگی در نزدیکی شهر حمزه مبین منشأ فاضلاب شهری برای نیترات در این بخش از آبخوان است. در مرداد ماه



شکل ۵- نقشه‌های هم نیترات منطقه مورد مطالعه، (a) دی‌ماه ۹۶، (b) مرداد ماه ۹۷ و (c) آبان ماه ۹۷  
 Fig. 5. Isonitrate maps for the study area, a) January 2018, b) August 2018 and c) November 2018



شکل ۶- نقشه کاربری اراضی گستره مورد مطالعه

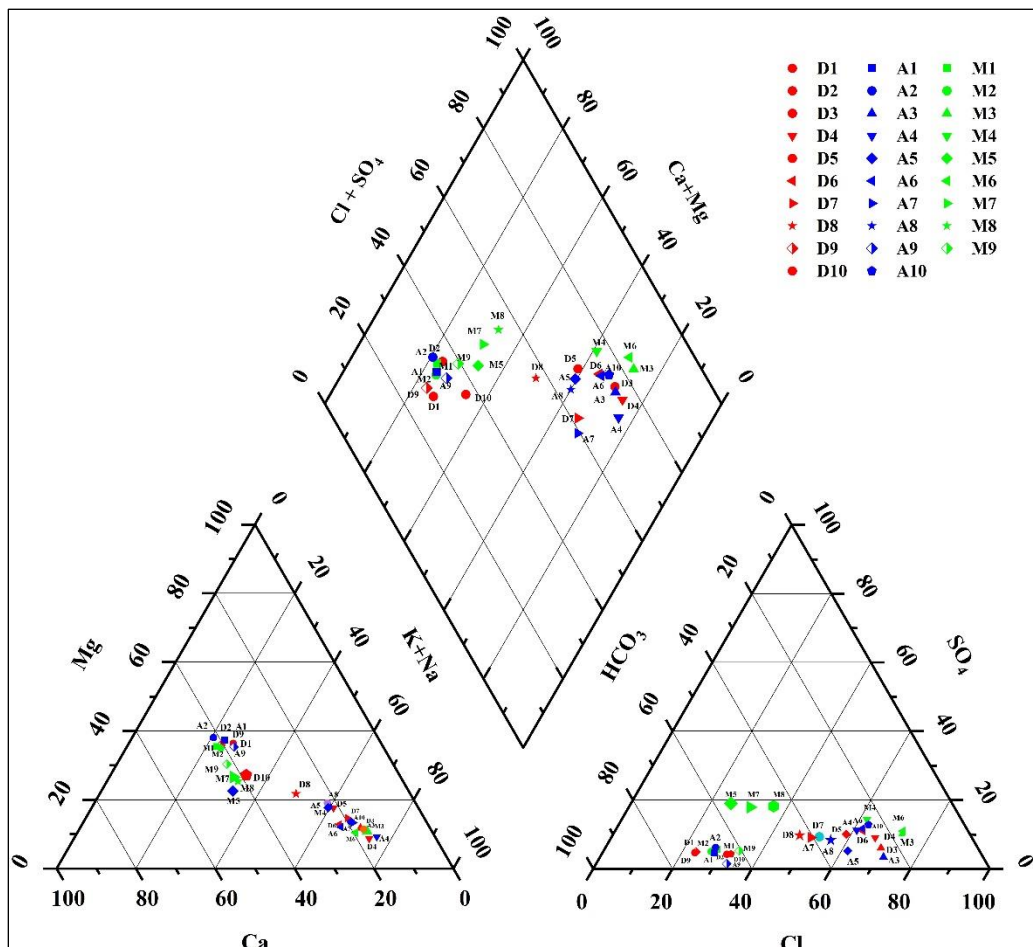
Fig. 6. Land use map of the study area

شامل می‌شود. این گروه‌ها به ترتیب دارای تیپ بی‌کربناته، بی‌کربناته-سولفات و کلروره هستند. غلظت پایین سولفات نمونه‌ها در مثلث آنیون‌ها نشان دهنده عدم سیر تکامل هیدروژن‌شیمیایی در آبخوان و

نمودار پایپر (شکل ۷) سه گروه نمونه را نشان می‌دهد. در مثلث آنیون‌ها گروه اول شامل نمونه‌های A1، A2 و A9، گروه دوم شامل نمونه‌های M1، M2، M9 و M7 می‌باشد و گروه سوم سایر نمونه‌ها را

دولومیت است. با توجه به نبود رخنمون‌های دولومیتی در منطقه مورد مطالعه وجود چنین تیپ و رخساره‌ای برای نمونه‌ها آب را به می‌توان به انحلال کلسیت‌های منیزیم‌دار نسبت داد. منشأ نمونه‌های گروه سه با تیپ و رخساره کلروره سدیک می‌تواند ناشی از انحلال هالیت یا نفوذ شورابه به محیط آبخوان باشد. گروه دوم اختلاط بین گروه‌های یک و سه را نشان می‌دهد.

رود مقدار زیادی کلر و سدیم به آبخوان است. در بخش لوزی نمودار پایپر نیز نمونه‌ها به سه گروه مجزا تقسیم می‌شوند، این گروه‌ها مشابه گروه‌های موجود در مثلث آنیونی و کاتیونی هستند. بر این اساس طبق نمودار پایپر سه منشأ اصلی متفاوت برای نمونه‌های آب در منطقه مورد مطالعه قابل شناسایی است (شکل ۷). نمونه‌های گروه اول با تیپ و رخساره بی‌کربناته کلسیک- منیزیک ناشی از انحلال کلسیت و



شکل ۷- نمودار پایپر نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه در سه دوره نمونه‌برداری

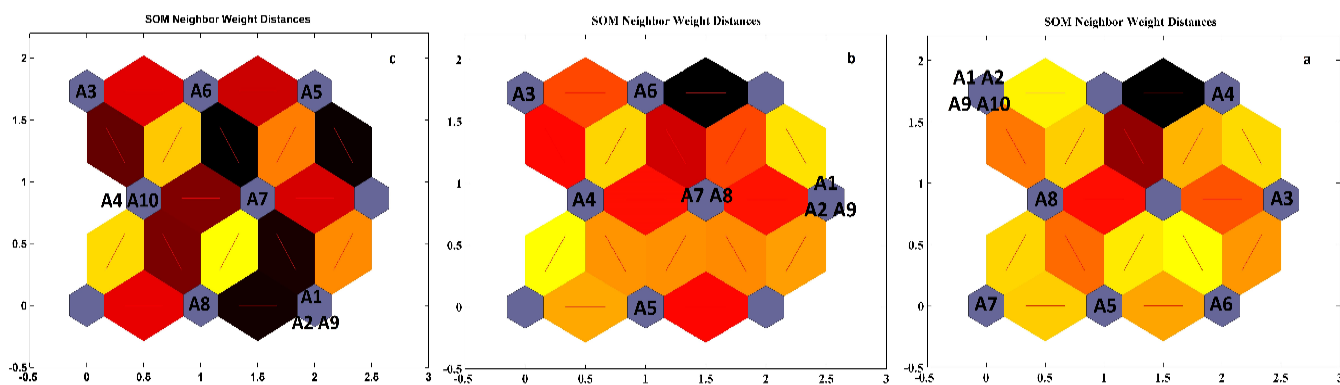
Fig. 7. Piper diagram of water samples from the study area for three sampling periods

بین گروه‌ها روشن‌تر باشد، اختلاف وزن کم‌تر است. در دوره دی‌ماه ۱۳۹۶ نمونه‌های ۱، ۲، ۹ و ۱۰ در یک گره قرار گرفته‌اند و بیش‌ترین نزدیکی را دارند. نمونه‌های ۵، ۷ و ۸ به یکدیگر نزدیک می‌باشند و با سایر نمونه‌ها اختلاف دارند. نمونه‌های ۳، ۴ و ۶ نیز به یکدیگر نزدیک‌تر می‌باشند و در یک گروه قرار گرفته‌اند. در دوره مردادماه ۱۳۹۷

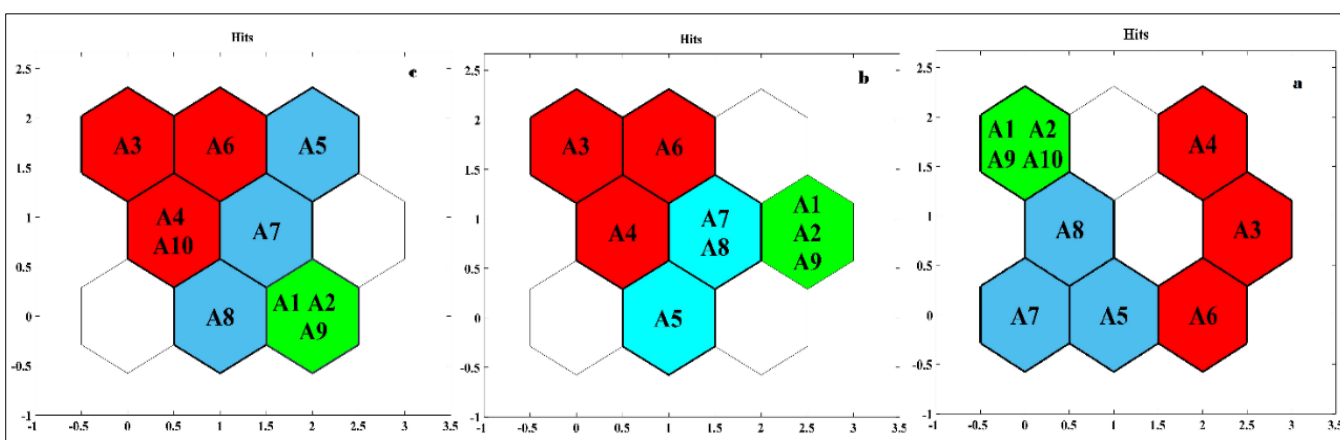
در نمودار نگاهت اختلاف وزن، نمونه‌هایی که در یک گره (Node) قرار می‌گیرند دارای بیش‌ترین شباهت هستند. تفاوت نمونه‌هایی که در گره‌های کنار یکدیگر قرار گرفتند براساس اختلاف وزن گره مشخص می‌شود، اختلاف وزن با استفاده از رنگ نمایش داده می‌شود. هر چقدر رنگ بین گره‌ها تیره‌تر باشد اختلاف وزن بیش‌تر است و هر چه رنگ

بر اساس تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی نمونه‌های آب به سه گروه مجزا بر اساس میزان شباهت تقسیم شدند. نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی بر روی نتایج نقشه خودسازمان‌ده اعمال شد. گروه اول که با رنگ سبز مشخص شده است شامل نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ دارای کم‌ترین مقدار EC و مواد محلول هستند. گروه سوم که با رنگ قرمز مشخص شده است دارای بیش‌ترین مقدار EC و مواد محلول هستند و گروه دوم که با رنگ آبی مشخص شده‌اند دارای مقادیر حد واسط EC و مواد محلول می‌باشند.

نمونه‌های ۱، ۲ و ۹ در یک گروه قرار گرفته‌اند و بیش‌ترین نزدیکی را دارند. نمونه‌های ۵، ۷ و ۸ به یکدیگر نزدیک بوده و با سایر نمونه‌ها اختلاف دارند. نمونه‌های ۳، ۴ و ۶ نیز به هم نزدیک هستند. در دوره آبان‌ماه ۱۳۹۷ نمونه‌های ۱، ۲ و ۹ در یک گروه قرار گرفته و بیش‌ترین نزدیکی را دارند. نمونه‌های ۵ و ۷ در یک گروه قرار دارند و با نمونه شماره ۸ نزدیک و با سایر نمونه‌ها اختلاف دارند. نمونه‌های ۳، ۴، ۶ و ۱۰ نیز به یکدیگر نزدیک‌تر بوده و در یک گروه قرار گرفته‌اند. در مردادماه و آبان‌ماه سال ۱۳۹۷ اختلاف نمونه‌های ۳ و ۴ بیش‌تر است با هر دو با نمونه ۶ نزدیکی دارند (شکل‌های ۸ و ۹).



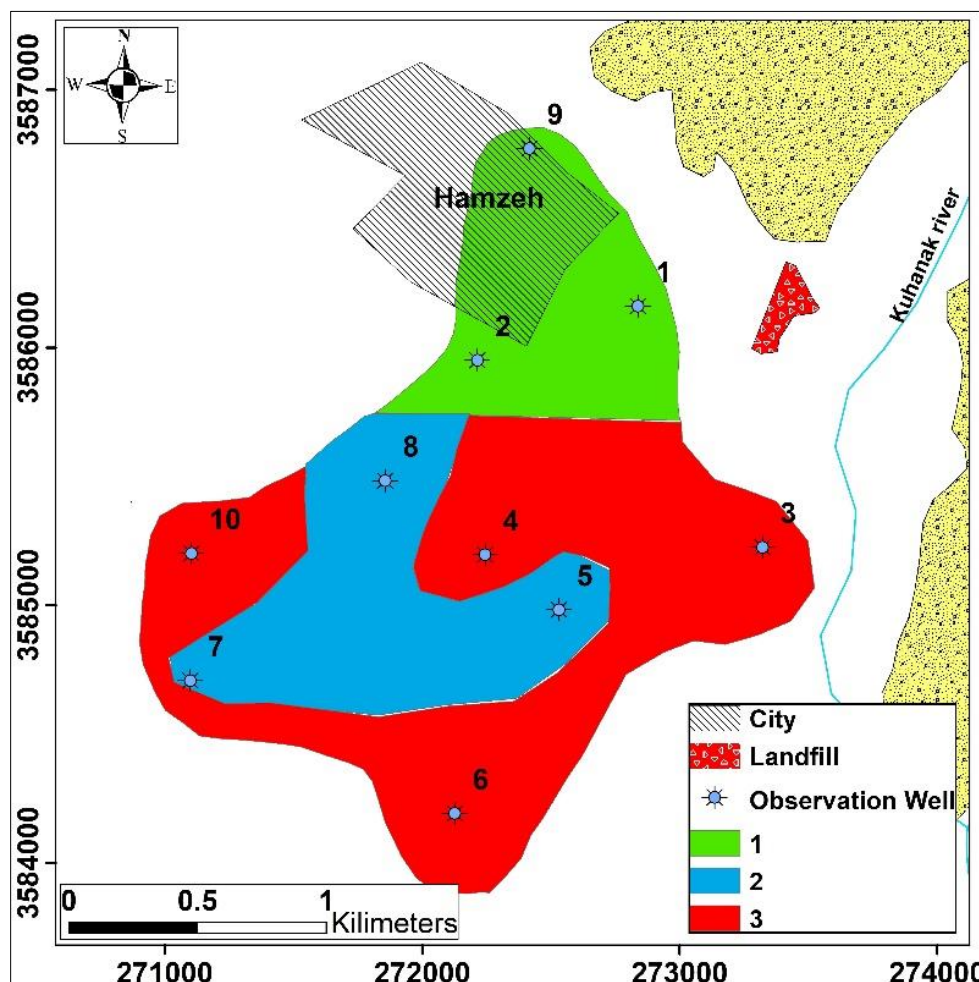
شکل ۸- نگاشت اختلاف وزن بین گره‌ها (a دی‌ماه ۱۳۹۶، b مردادماه ۱۳۹۷ و c آبان‌ماه ۱۳۹۷)  
 Fig. 8. Weight difference mapping between nodes, a) January 2018, b) August 2018 and c) November 2018



شکل ۹- نتایج خوشه‌بندی بر روی نگاشت خودسازمان‌ده (a دی‌ماه ۱۳۹۶، b مردادماه ۱۳۹۷ و c آبان‌ماه ۱۳۹۷)  
 Fig. 9. Clustering results on self-organizing maps, a) January 2018, b) August 2018 and c) November 2018

در گروه‌های مختلف تغییرات زیادی ندارند. غلظت نیترات الگوی خاصی ندارد. در آبان‌ماه ۱۳۹۷ مقدار هدایت الکتریکی به ترتیب گروه‌ها برابر با ۴۶۷/۶، ۸۹۹/۳ و ۱۲۹۷ میکروموس بر سانتی‌متر است. غلظت کلسیم به ترتیب گروه‌ها برابر با ۱/۸، ۱/۹ و ۲/۲ میلی‌اکی‌والان بر لیتر است. غلظت سدیم به ترتیب ۱، ۵/۵ و ۸/۵ میلی‌اکی‌والان بر لیتر است. افزایش کم‌تر مقدار کلسیم نشان دهنده انحلال طبیعی کلسیم در مسیر حرکت است. اما افزایش مقدار هدایت الکتریکی، سدیم و کلر، نشان دهنده انحلال هالیت یا نفوذ شورابه به محیط آبخوان است.

به منظور بررسی پراکندگی گروه‌های تعیین شده به وسیله خوشه‌بندی و SOM، موقعیت نمونه‌ها بر روی نقشه نمایش داده شده است (شکل ۱۰) و همچنین میانگین مقادیر هر گروه محاسبه شد (جدول ۴). نمونه‌ها در گروه اول، دوم و سوم به ترتیب از شمال به سمت جنوب منطقه مورد مطالعه قرار دارند. مقادیر میانگین برای هر گروه محاسبه شده است. مقدار EC و مواد محلول از گروه اول به سوم افزایش پیدا می‌کند. میانگین متغیرها در هر سه دوره نمونه‌برداری نشان می‌دهد که هدایت الکتریکی و مقادیر سدیم و کلر از گروه ۱ به ۳ افزایش پیدا می‌کنند. مقادیر سولفات، بی‌کربنات، کلسیم و منیزیم



شکل ۱۰- نقشه گروه‌بندی نمونه‌ها حاصل از خوشه‌بندی و نگاشت خودسازمان‌ده در منطقه مورد مطالعه، آبان‌ماه ۱۳۹۷  
 Fig. 10. Map of sample groupings resulting from clustering and self-organizing map in the study area, November 2018

جدول ۴- میانگین پارامترهای هیدروشیمی گروه‌های مبتنی بر SOM در سه دوره نمونه‌برداری

Table 4. Average hydrochemical parameters of SOM-based groups in three sampling periods

Period	Group	EC	Ca	Mg	Na	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>
		µmho/cm	meq/l						mg/l
January 2018	1	502.2	1.8	1.6	1.2	3.1	1.3	0.2	29.1
	2	931.6	1.9	1.4	4.9	3.4	4.5	0.8	27.8
	3	1356.6	2.1	1.4	9.0	3.0	8.7	1.1	27.9
August 2018	1	457.6	1.8	1.7	1.0	2.3	1.0	0.2	50.7
	2	873	1.9	1.5	5.4	2.7	5.4	0.6	41.2
	3	1296	2.1	1.5	8.7	2.5	8.5	1.0	45.8
November 2018	1	467.6	1.8	1.7	1.0	2.9	1.3	0.1	26.0
	2	899.3	1.9	1.4	5.5	3.2	4.9	0.6	21.3
	3	1297.0	2.2	1.4	8.5	3.1	7.8	1.1	27.8

با تبیین ۳۲/۴ درصد از واریانس به‌عنوان عامل دوم شناسایی شدند. در مردادماه ۱۳۹۷ سدیم و کلر با تبیین ۵۸/۷ درصد از واریانس به‌عنوان عامل اصلی و کلسیم و منیزیم با تبیین ۹۲/۲ درصد از واریانس به‌عنوان عامل دوم شناسایی شدند (جدول ۵). همچنین پارامترهای مؤثر در عامل دوم کلسیم و منیزیم و عامل سوم سولفات می‌باشد. عامل دوم را می‌توان به انحلال کلسیت و دولومیت مربوط دانست و انحلال ژئیس می‌تواند فرآیندی برای تبیین عامل سوم باشد.

برای انجام تحلیل عاملی از پارامترهای کلسیم، منیزیم، کلر، سدیم و سولفات استفاده شد. در صورت استفاده از تمامی پارامترها از قبیل بی‌کربنات و پتاسیم شاخص KMO کاهش پیدا کرده و نتیجه غیرقابل قبولی برای تحلیل عاملی به دست می‌آید (Kaiser, 1974). در نتیجه برای افزایش این شاخص برخی از پارامترها از جمله بی‌کربنات حذف شده و پارامترهای مهم‌تر حفظ شدند. در دی‌ماه ۱۳۹۶ سدیم و کلر با تبیین ۶۱/۸ درصد از واریانس به‌عنوان عامل اصلی و کلسیم و منیزیم

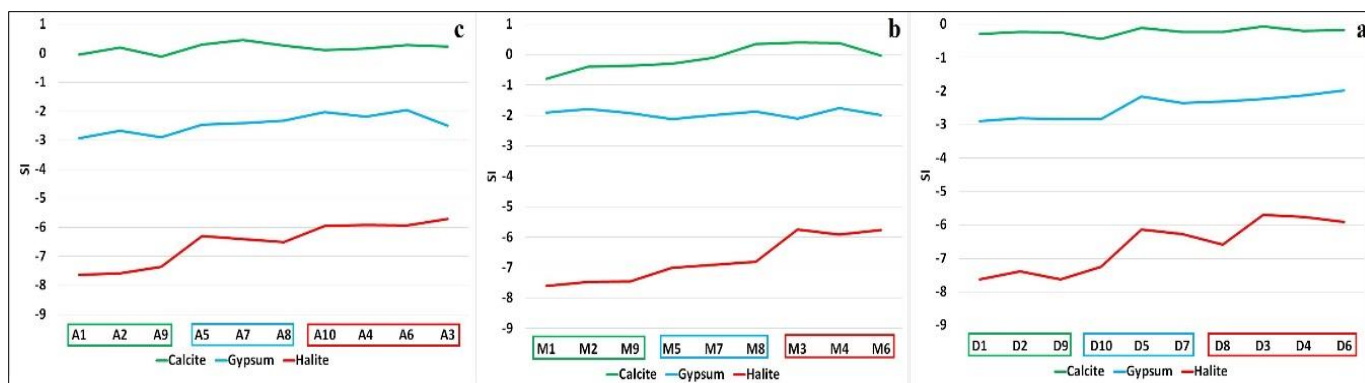
جدول ۵- مقدار بار یون‌ها بر روی عامل‌ها بعد از چرخش Varimax برای سه دوره نمونه‌برداری

Table 4. The factor loadings of ions after Varimax rotation for three sampling periods

	January 2018			August 2018			November 2018		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Cl	0.99	0.47	0.14	0.95	0.09	0.29	0.95	0.13	0.29
Na	0.99	-0.01	0.15	0.95	0.06	0.30	0.93	-0.06	0.36
Ca	0.35	0.86	0.34	0.31	0.91	0.26	0.43	0.83	0.28
Mg	-0.19	0.95	-0.17	-0.16	0.92	-0.35	-0.31	0.83	-0.41
SO <sub>4</sub>	0.79	0.02	0.60	0.53	-0.08	0.84	0.41	-0.05	0.91
Variance %	61.83	32.40	4.23	58.78	33.91	6.63	61.19	28.90	7.83
% Cumulative	61.83	92.24	98.47	58.78	92.70	99.34	61.19	90.09	97.92

ثابتی دارد. الگوی مشابه شاخص اشباع این کانی‌های ژئوپس و کلسیت، تأیید کننده عدم انحلال این کانی‌ها در میانه و پایین دست آبخوان است. اما کانی هالیت از بالا دست به سمت پایین دست مقدار افزایشی را نشان می‌دهد که نشان دهنده انحلال این کانی در مسیر جریان است. این شاخص تأیید کننده نتایج تحلیل عاملی و نشان دهنده انحلال هالیت در محدوده مورد مطالعه است.

به منظور تأیید نتایج حاصل از تحلیل عاملی، شاخص اشباع کانی‌های کلسیت، ژئوپس و هالیت محاسبه شد (شکل ۱۱). شاخص اشباع کانی کلسیت مقدار ثابت و اشباع را از گروه ۱ (سبز)، به سمت گروه‌های ۲ (آبی) و ۳ (قرمز) را نشان می‌دهد. شاخص اشباع کانی ژئوپس در تمام نمونه‌های هر سه دوره تحت اشباع است و تقریباً مقدار



شکل ۱۱- شاخص اشباع کانی‌های کلسیت، ژئوپس و هالیت دوره‌های (a) دی ماه ۱۳۹۶، (b) مرداد ماه ۱۳۹۷ و (c) آبان ماه ۱۳۹۷

Fig. 11. Saturation index of calcite, gypsum, and halite minerals for the periods of a) January 2018, b) August 2018 and c) November 2018

نیز نقش انحلال هالیت را تأیید نمود. خوشه‌بندی SOM نمونه‌ها را به سه گروه متمایز با ویژگی‌های کیفی متفاوت تفکیک کرد که تطابق مناسبی با موقعیت مکانی چاه‌ها و شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه داشت. این نتایج نشان می‌دهد که آلودگی نیترات در محدوده مورد مطالعه بیش از آنکه ناشی از فرآیندهای طبیعی باشد، تحت تأثیر منابع انسان‌زاد نظیر نفوذ فاضلاب شهری و فعالیت‌های سطحی قرار دارد.

به طور کلی، یافته‌های این مطالعه کارایی بالای تلفیق روش نگاشت خودسازمان‌ده با داده‌های هیدروشیمیایی را در شناسایی فرآیندهای حاکم بر کیفیت آب زیرزمینی و تفکیک منابع آلودگی نشان می‌دهد. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در پایش کیفی آب‌های زیرزمینی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در تأمین و حفاظت منابع آب شرب در مناطق شهری و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با تلفیق روش‌های هیدروژئوشیمیایی و آماری چند متغیره شامل تحلیل عاملی، خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و نگاشت خودسازمان‌ده، منشأ و الگوی فضایی آلودگی نیترات در آبخوان شرق شهر دزفول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات هدایت الکتریکی و غلظت یون‌های سدیم و کلر از شمال به جنوب منطقه افزایش یافته و فرآیند غالب مؤثر بر شوری آبخوان، انحلال هالیت در مسیر جریان آب زیرزمینی است. در مقابل، غلظت نیترات در خوشه‌های مختلف الگوی مشخصی از افزایش یا کاهش هم‌زمان با شوری نشان نداد که بیانگر کنترل متفاوت این آلاینده نسبت به فرآیندهای طبیعی هیدروژئوشیمیایی است.

تحلیل عاملی، سدیم و کلر را به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر هیدروشیمی آب زیرزمینی شناسایی کرد و نتایج شاخص اشباع کانی‌ها

## References

- Azari, T., Kadar-Ghale, M.T., Kardel, F., 2023. Influence of the Babolsar landfill leachate on groundwater quality. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 9(1), 227-59. <http://dx.doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.106451>. (in Persian)
- Choi, B.Y., Yun, S.T., Kim, K.H., Kim, J.W., Kim, H.M., Koh, Y.K., 2014. Hydrogeochemical interpretation of South Korean groundwater monitoring data using self-organizing maps. *Journal of Geochemical Exploration* 137, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.12.001>.
- Fida, M., Li, P., Alam, S.K., Wang, Y., Nsabimana, A., Shrestha, P.S., 2024. Review of groundwater nitrate pollution from municipal landfill leachates: implications for environmental and human health and leachate treatment technologies. *Exposure and Health* 16, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s12403-023-00624-2>.
- Gao, H., Wang, G., Fan, Y., Wu, J., Yao, M., Zhu, X., Guo, X., Long, B., Zhao, J., 2024. Tracing groundwater nitrate sources in an intensive agricultural region integrated of a self-organizing map and end-member mixing model tool. *Scientific Reports* 14(1), 16873. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67735-x>.
- Gholami, V., Khaleghi, MR., Taghvaye Salimi, E., 2020. Groundwater quality modeling using self-organizing map (SOM) and geographic information system (GIS) on the Caspian southern coasts. *Journal of Mountain Science* 17(7), 1724-1734. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5483-y>.
- Jafari, F., Nassery, H.R., Alijani, F. Maknooni Gilani, S., 2025. Identification of salinity sources in groundwater at Golgohar Mine using self-organizing maps (SOM) and correlation analysis: a hydrogeochemical and isotopic approach, south-central Iran. *Environmental Geochemistry and Health* 47(4), pp.1-25. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02414-y>.
- Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity. *psychometrika* 39(1), 31-36.
- Kohonen, T., 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological cybernetics* 43(1), 59-69. <https://doi.org/10.1007/BF00337288>
- Langmuir, D., 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, Upper Saddle River., New Jersey, 601p.
- Lee, K.J., Yun, S.T., Yu, S., Kim, K.H., Lee, J.H., Lee, S.H., 2019. The combined use of self-organizing map technique and fuzzy c-means clustering to evaluate urban groundwater quality in Seoul metropolitan city, South Korea. *Journal of Hydrology* 569, 685-697. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.031>.
- Mester, T., Szabó, G., Kiss, E., Balla, D., 2024. Long-term spatiotemporal changes in nitrate contamination of municipal groundwater resources after sewerage network construction in the Hungarian Great Plain. *Environmental Science and Pollution Research* 31(51), 61114-61137. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35280-9>
- Moghimi, H., 2017. Assessment of Hydro-geochemical factors affecting coastal aquifer of Ghaemshar using by factor analysis and clustering. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 3(1), 93-112. <https://doi.org/10.29252/gnf.3.1.93>. (in Persian)
- Moosavi, V., Vafakhah, M., Shirmohamadi, B., 2013. A wavelet-ANFIS hybrid model for groundwater level forecasting for different prediction periods. *Water Resources Management* 27, 1301-1321. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0239-2>.
- Mor, S., Negi, P., Ravindra, K., 2018. Assessment of groundwater pollution by landfills in India using leachate pollution index and estimation of error. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* 10, 467-476. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2018.09.002>.
- O'B Perry, J.T., Setudehnia, A., 1967. *Dezful Geological Compilation Map, 1:100 000*. Iranian Oil operating Companies, geological and exploration division., Tehran. <http://csw.ngdir.ir>.
- Shakeri, A., Sharafi, N., Mehr, M.R., Abdollahbeglou, L., 2025. Assessment of water quality and hydrogeochemical processes in proximity to a municipal landfill site: case study of the Mohammadabad Landfill, Qazvin, Iran. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 11(1),103-130. <http://dx.doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.107782>. (in Persian)
- Shang, Y., Fu, C., Zhang, W., Li, X., Li, X., 2024. Groundwater hydrochemistry, source identification and health assessment based on self-organizing map in an intensive mining area in Shanxi, China. *Environmental Research* 252, 118934. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118934>.
- Singha, S.S., Singha, S., Kumar, P., 2025. Groundwater quality assessment in Nalgonda District, Telangana, India: a comprehensive approach using self organizing map. *Discover Sustainability* 6(1), 185. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00985-5>.

- Soroush, F., Seifi, A., 2019. Application of a self-organizing map for clustering the groundwater quality in Kerman province and assessment its suitability for drinking and irrigation purposes. *Journal of Water and Soil Science* 23(2), 281-302. <https://doi.org/10.29252/jstnar.23.2.281>. (in Persian)
- Sridhar, D., Parimalarenganayaki, S., 2024. A comprehensive review on groundwater contamination due to sewer leakage: sources, detection techniques, health impacts, mitigation methods. *Water, Air & Soil Pollution* 235(1), 56. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06852-1>.
- Srivastava, K.S., Ramanathan, L.A., 2008. Geochemical assessment of groundwater quality in vicinity of Bhalswa landfill, Delhi, India, using graphical and multivariate statistical methods. *Environmental Geology* 53, 1509-1528. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0762-2>.
- Suk, H., Lee, K.K., 1999. Characterization of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: clustering into ground water zones. *Groundwater* 37(3), 358-366. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb01112.x>.
- Tabachnick, B.G., Fidell L., 2007. *Using Multivariate Statistics*, 7<sup>th</sup> Ed., Allyn and Bacon., New York, 1076p.
- Tafazoli, M., Bagheri, R., Sharif, M.A., 2025. Hydrochemical tracing and salinity origin of water resources based on combined diagrams in the Sabzevar plain. *chemistry* 170(3962), pp.1088-1090. <http://dx.doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.108001>.
- Tian, Y., Su, J., Liu, Y., Wang, S., Zhao, Y., Ji, Y., Dang, Q., Liu, Q., 2025. Self-Organizing Map provides new insights into the MixSIAR model for calculating the source contributions of sulfate contamination in groundwater. *Environmental Pollution* 373, 126089. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126089>.
- Tlili-Zrelli, B., Azaza F.H., Gueddari, M., Bouhlila, R., 2012. Geochemistry and quality assessment of groundwater using graphical and multivariate statistical methods, A case study: Grombalia phreatic aquifer (Northeastern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences* 6, 3545-3561. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0617-3>.
- Wdowczyk, A., Szymańska-Pulikowska, A., Gupta, A., 2024. Application of selected indicators to assess contamination of municipal landfill leachate and its impact on groundwater. *Water Resources and Industry* 32, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100265>.
- Wang, Q., Wang, D., Wen, X., Yu, G., He, N., Wang, R., 2015. Differences in SOM decomposition and temperature sensitivity among soil aggregate size classes in a temperate grasslands. *PLoS One*, 10(2), p.e0117033. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117033>.
- Zhang, B., Li G., Cheng, P., Yeh, T.C., Hong, M., 2016. Landfill risk assessment on groundwater based on vulnerability and pollution index. *Water Resources Management* 30(4), 1465-1480. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1233-x>.