

Original Research Paper

Determination of groundwater salinity origin in mine 2 of Golgohar, Sirjan using self-organizing map and cluster analysis

Farnoosh Jafari¹, Hamid Reza Nassery^{1*}, Farshad Alijani¹, and Saeed Maknooni Gilani²

¹ Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, Jahad-e-Daneshgahi University, Rasht, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2024 April 22

Accepted: 2024 October 13

Available online: 2024 December 21

Keywords:

Hydrogeochemical origin determination

Groundwater

Self-Organizing Mapping (SOM)

Brine Water

Sirjan Golgohar mine

ABSTRACT


One of the main essential aspects of mining operations is the drainage of interfering waters to enable the underground mining process. To achieve this, it is necessary to first identify the source of water entering the mine pit and the hydrogeological regime of the region where the mine is located. Identifying hydrogeochemical processes and the origin of salinity for groundwater management in mines can significantly help in understanding the hydrogeological regime of the area and determining appropriate drainage mechanisms for mine pit. The aim of this study is to investigate the hydrogeochemistry of major ions and determine the origin of salinity in the Golgohar mines of Sirjan using Self-Organizing Maps (SOM), Hierarchical Clustering Analysis (HCA), and Heat Maps. Twenty water samples within the Golgohar mine area, located in southern Iran, were evaluated. Based on the analysis of combined hydrochemical diagrams, the predominant process in the Golgohar mine pit area No. 2 and the Kheirabad salt pan is halite dissolution. Additionally, studies have shown that reverse cation exchange and gypsum dissolution have also occurred. According to hydrogeochemical analysis, the main type and facies of all groundwater samples in the region are chloride-sodic. The alignment of hierarchical cluster analysis results with self-organizing maps classified the origin of the study area's waters into four groups: alluvial aquifer (Group A), Mixed (Group B), Deep brine water or hard rock aquifer (Group C), and Kheirabad salt pan brine (Group D). It was also determined that there is a hydraulic and hydrogeochemical connection between the Kheirabad salt pan and the groundwater of mine pit 2. However, the primary source of groundwater salinity in the hard rock aquifer does not have a connection with the Kheirabad salt pan, and even if this connection is accepted, its primary role is in determining its hydrogeochemical regime with intense mixing with other waters in the area. The results of this study demonstrate the advantage of the self-organizing mapping method for explicit understanding of hydrochemical processes in mining areas and brine waters.


* Corresponding author: Hamid Reza Nassery; E-mail: h-nassery@sbu.ac.ir

Citation:

Jafari, F., Nassery, H. R., Alijani, F., Maknooni Gilani, S., 2024. Determination of groundwater salinity origin in mine 2 of Golgohar, Sirjan using self-organizing map and cluster analysis. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 34(4), 134, 37-54. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.452583.2140>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2024.452583.2140

 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.4.3.3



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

1. Introduction

Groundwater is crucial in arid and semi-arid regions as well as in mining areas. Therefore, understanding the evolution of groundwater components concerning mining is vital for effective management of groundwater resources (Richter et al., 1991). The most widespread and common contamination of groundwater is salinity. Mining activities may impact the quality of groundwater due to the mixing of groundwater from various aquifers (Liu et al., 2017).

Multivariate statistical methods are commonly used to assess temporal and spatial changes in groundwater quality, such as cluster analysis, factor analysis, and Principal Component Analysis (PCA) (Orak et al., 2020; Rahman et al., 2022). However, since these methods are largely based on linear mathematical principles, solely relying on them sometimes isn't sufficient for meaningful classification of complex hydrochemical datasets (Nguyen et al., 2015). Recently, with the rapid development of artificial intelligence and neural networks, Self-Organizing Map (SOM) models with their self-adaptive and nonlinear features have increasingly been employed for grouping in hydrogeology (Nakagawa et al., 2020; Wang et al., 2023). Therefore, the SOM method can be considered a significant advantage for studies related to water quality classification in complex watershed environments (Koudenoukpo et al., 2021).

Understanding the hydrogeological and hydrogeochemical characteristics around the Golgohar 2 mine in Sirjan with the aim of providing an implementation solution for dewatering the mine is one of the main aspects of managing groundwater resources around the Golgohar 2 mine. Understanding the primary source of groundwater recharge, the origin of salinity around the Golgohar 2 mine, and the hydrogeology of the system using hydrogeochemical methods can significantly help solve problems arising from groundwater leakage into the mine. This study was conducted to determine the source of salinity in the groundwater of the Golgohar 2 mine in Sirjan using self-organizing mapping, cluster analysis, and hydrochemistry methods to enhance the role of hydrogeology in mine drainage.

2. Research methodology

The Golgohar mine is one of the largest known iron ore deposits in the Middle East, located in the southeastern part of the Sanandaj-Sirjan zone, approximately 60 kilometers southwest of Sirjan city. Around the Golgohar area, there are several playas, including the Kheirabad salt pan, which serve as a local base level (Fig. 1). The geological formations of the Golgohar mining area primarily consist of a metamorphic complex including phyllite, schist, amphibolite, gneiss, marl, and other metamorphic rocks, accompanied by granite associated with regional tectonics (Sabzehei et al., 1997). The surface geology in this area is mainly composed of young alluvial

deposits including consolidated sediments and conglomerates, along with clay and silt layers of Quaternary age.

In order to investigate the source of water in Golgohar Mine 2 pit in Sirjan, sampling was conducted from 20 water sources in Esfand 1400 (March 2021). The sampling points included 11 groundwater entries to Golgohar Mine 2 pit, three observation wells, and four points at the Kheirabad salt pan. The data were categorized into Group A, Group B, Group C, and Group D, with previous studies classified as Group E (Maknooni, 2018) and Group F (Assari, 2019) (Fig. 1).

Field measurements included monitoring parameters such as electrical conductivity (EC), pH, and temperature onsite using a portable HACH eq device from the United States (Table 2). Groundwater samples were collected daily from predetermined locations and gathered in 500 ml polyethylene bottles, which were then labeled. The collected samples were quickly sent to the water and oil laboratory of the Golgohar Mining and Industrial Company for the analysis of major cations and anions.

To understand the groundwater system and identify the predominant hydrogeochemical processes in the Golgohar mine and Kheirabad salt pan aquifers, hydrogeochemical methods (Piper diagram and ionic ratio diagram) were used. Additionally, to examine and determine the origin of the groundwater in Golgohar Mine 2 in Sirjan, the results from the sample measurements were analyzed using hierarchical cluster analysis (HCA) and artificial neural network modeling (self-organizing map, SOM). In this study, the hydrogeochemical data of 20 groundwater samples were analyzed using SOM, considering 9 hydrogeochemical indices) Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , pH, and EC).

3. Results

Electrical conductivity (EC) as an indicator of salinity ranged from 8.1 to 526 m mho/cm. The highest EC value was observed in sample D4 from the salt pan. Approximately 95.3% of the samples had an EC greater than 10 m mho/cm. The EC of samples from the salt pan was higher than those from the pit and boreholes, indicating greater salinity in the groundwater of the salt pan area. The cation sequence is $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, while the anion sequence is $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ across all four groups A to D. The hydrogeochemical facies in the mining area and Kheirabad pan (in all six classified groups) is Na-Cl.

3.1. Determining the Origin of Salinity in the Groundwater of Golgohar Sirjan mine

3.1.1. Hierarchical Cluster Analysis

The dendrograms differentiate the waters from the initial benches of mine 2 Pit and the surrounding boreholes from those located

in the final benches of mine 2 Pit of Golgohar and the Kheirabad salt pan areas. Based on the similarities, sampling points have been classified into four groups. According to dendrogram Fig. 6, which illustrates the relationships between samples, magnesium and calcium show the highest similarity to chloride and sodium, indicating that the groundwater is associated with reverse cation exchange processes. The grouping of sodium and chlorine in a subgroup also suggests the occurrence of halite dissolution in the area.

3.1.2. Self-Organizing Map (SOM)

In the SOM model, the output layer's neurons number in the neural network were selected to be 25, based on the heuristic method proposed by Vesanto and Alhoniemi (2000), then, Self-organizing maps were generated. The color gradient of the variables in the SOM matrix shows the relationships between them. The ions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , and EC exhibit similar color gradients, indicating that these six parameters are positively correlated.

4. Discussions

This study, utilizing previous data as well as performing hydrogeochemical analyses and interpretations from hierarchical cluster analysis and self-organizing map, aims to identify the source of salinity in the groundwater at Golgohar Mine 2 in Sirjan and Kheirabad salt pan. According to Fig. 4, halite dissolution is likely the main source of salinity in both the alluvial and hard rock aquifers as well as the Kheirabad salt pan. Additionally, reverse cation exchange also occurred in the mixed group and the hard rock aquifer, altering the water chemistry. Overall, with the results obtained from the HCA dendrogram and SOM, the origin of the water in Golgohar Mine (Mine 2) and Kheirabad salt pan was successfully classified into four groups:

Group A: This group relates to waters from the alluvial aquifer and samples with the minimum concentration. This group includes samples P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, W1, W3, W4, which are from leakage levels located in the initial benches of Mine 2 and the boreholes around Pit 2.

Group B: This group relates to waters with a mixed origin (P11, P12, P13, D1, D2). Samples P11, P12, and P13 result from the

mixture of alluvial aquifer with hard rock aquifer (due to their locations in the lower benches of Pit 2). Salty waters from hard rocks reach the alluvial aquifer through fractures and faults, and mixing occurs. Samples D1 and D2 are obtained from the mixture of alluvial aquifer water with Kheirabad salt water.

Group C: This group relates to water from hard rock aquifer. Samples P9, P10, and D5 are included in this group.

Group D: Originates from the brine of the Kheirabad salt pan. Only sample D4, which was taken from the lake of the Kheirabad salt pan, is belong to this group. Salinity in this group is due to halite dissolution, intense evaporation, and reverse cation exchange.

5. Conclusion

This paper focuses on the chemistry of major ions at Golgohar Mine 2 in Sirjan and the Kheirabad salt pan to determine the sources of salinity and hydrochemical processes using self-organizing maps and hierarchical cluster analysis with the aid of heat map. SOM, in conjunction with HCA clustering, provided better results than other methods (such as Piper diagrams and ion ratios), for grouping and determining the origin of water in the study area.

Halite dissolution is likely the main source of salinity in both the alluvial and hard rock aquifers as well as the Kheirabad salt pan. Additionally, reverse cation exchange has occurred in the mixing group and the hard rock aquifer due to the long residence time of sodium-rich groundwater, possibly altering the water chemistry, with minor direct cation exchange and gypsum dissolution in a few samples from the alluvial aquifer. The results indicate that the chemical composition of the water from the Kheirabad salt pan does not correlate with that of the hard rock formation. Therefore, it can be concluded that the main source of salty water in the hard rock aquifer is not the Kheirabad salt pan, and if there is a connection, it mixes very intensely with other waters. However, there is a connection between the alluvial aquifer of Mine 2 and the Kheirabad salt pan.

Acknowledgements

This research has been financially supported by a joint project between Shahid Beheshti University and the Gohar pouyesh Gam Mining and Industrial Company.

تعیین منشأ شوری آب زیرزمینی معدن ۲ گل گهر سیرجان با استفاده از روش‌های نگاشت خودسازمان‌ده و تحلیل خوشه‌ای

فروش جعفری^۱، حمیدرضا ناصری^{۱*}، فرشاد علیجانی^۱ و سعید مکنونی گیلانی^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه جهاد دانشگاهی، رشت، ایران

چکیده

یکی از بخش‌های ضروری در عملیات استخراج معادن، زهکشی آب‌های مزاحم برای امکان‌پذیر شدن فرایند معدن‌کاری در زیر سطح ایستایی است. به این منظور، ابتدا لازم است منشأ آب‌های ورودی به کاواک معدن و رژیم هیدروژئولوژی منطقه‌ای که معدن در آن واقع شده است، شناخته شود. شناسایی فرایندهای هیدروژئوشیمی و منشأ شوری برای مدیریت آب‌زیرزمینی در معادن می‌تواند به شناخت رژیم هیدروژئولوژیکی منطقه و تعیین سازوکار (مکانیسم) زهکشی مناسب کاواک معدن کمک شایانی کند. در این پژوهش، هدف بررسی هیدروژئوشیمی یون‌های اصلی و تعیین منشأ شوری در معدن گل گهر سیرجان با استفاده از نگاشت خودسازمان‌ده (Self Organizing Map)، تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی (Hierarchical Clustering Analysis)، و نقشه حرارتی (Heat map) است. تعداد ۲۰ نمونه آب در گستره معدن گل گهر سیرجان، واقع در جنوب مرکزی ایران، مورد سنجش قرار گرفت. بر اساس تحلیل نمودارهای ترکیبی هیدروشیمی، فرایند چیره در گستره کاواک معدن شماره ۲ گل گهر و کفه نمکی خیرآباد، انحلال هالیت است. افزون بر این، مطالعات نشان داد که تبادل کاتیونی معکوس و انحلال ژپیس نیز رخ داده است. براساس تحلیل هیدروژئوشیمی، نوع و رخساره اصلی تمام نمونه‌های آب‌زیرزمینی منطقه کلروره سدیک می‌باشد. هماهنگی نتایج تحلیل سلسله مراتبی با نقشه‌های خودسازمان‌ده، منشأ آب‌های گستره مورد مطالعه را به چهار گروه: آب‌های آبخوان آبرفتی (گروه A)، اختلاطی (گروه B)، آب شورابه ژرفی و یا سازند سخت (گروه C) و شورابه کفه نمکی خیرآباد (گروه D) طبقه‌بندی کرده است. همچنین مشخص شد که ارتباط هیدرولیکی و هیدروژئوشیمی بین کفه نمکی خیرآباد و آب زیرزمینی بیت معدن ۲ وجود دارد، اما منشأ اصلی شورشدگی آبخوان سنگ سخت، ارتباطی با کفه نمکی خیرآباد ندارد و در صورت پذیرش این ارتباط نیز نقش اصلی تعیین رژیم هیدروژئوشیمی آن با اختلاط بسیار شدیدی با سایر آب‌های موجود در منطقه است. نتایج این مطالعه برتری روش نگاشت خودسازمان‌ده برای درک صریح فرایندهای هیدروشیمیایی در مناطق معدنی و شورابه‌ها را نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

منشأیابی هیدروژئوشیمی

آب زیرزمینی

نگاشت خودسازمان‌ده (SOM)

شورابه

معدن گل گهر سیرجان

۱- پیش‌نوشتار

(Lall et al., 2020). بنابراین، درک تکامل اجزای آب‌زیرزمینی در رابطه با معدن‌کاری برای مدیریت موثر منابع آب‌زیرزمینی مهم است (Rahman et al., 2022). گسترده‌ترین و متداول‌ترین آلودگی آب‌زیرزمینی، شوری است (Richter et al., 1991). فعالیت‌های معدنی ممکن است بر کیفیت آب‌های زیرزمینی در نتیجه اختلاط آب‌های زیرزمینی از آبخوان‌های متعدد، تأثیر بگذارد (Liu et al., 2017). افزون بر این، احتمال آسیب به سیستم آبخوان چندلایه در طی فرایندهای معدنی، خطر

آب‌زیرزمینی یک منبع طبیعی گرانبها است که برای مصارف آشامیدنی، خانگی، کشاورزی و صنعتی در سطح جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rahman et al., 2022). در مناطق خشک و نیمه خشک و گستره‌های معدنی وجود آب‌زیرزمینی بسیار حیاتی است. در طول مسیر جریان کیفیت آب‌زیرزمینی به طور کلی از طریق اختلاط، آلودگی‌ها، واکنش‌های بیوژئوشیمی و فرایندهای هوازدگی ژئوشیمی تغییر می‌کند. این تغییرات ممکن است بر محیط‌های آبی و سلامت انسان تأثیر بگذارد

* نویسنده مسئول: حمیدرضا ناصری؛ E-mail: h-nassery@sbu.ac.ir

ماخذنگاری:

جعفری، ف.، ناصری، ح. ر.، علیجانی، ف.، مکنونی گیلانی، س.، ۱۴۰۳، تعیین منشأ شوری آب زیرزمینی معدن ۲ گل گهر سیرجان با استفاده از روش‌های نگاشت خودسازمان‌ده و تحلیل خوشه‌ای. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۴)، ۳۷-۵۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.452583.2140>

doi: 10.22071/gsj.2024.452583.2140



doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.4.3.3

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

معدن گل‌گهر سیرجان از این کفه نمکی باشد. جهانشاهی و زارع (Jahanshahi and Zare, 2017) بیان کرده‌اند که، در معدن گل‌گهر دو آبخوان وجود دارد: یکی آبخوان آبرفتی، به عنوان آبخوان بالایی و دیگری آبخوان سنگ سخت (سنگ‌های دگرگونی) که در زیر قرار گرفته است و بین این دو آبخوان لایه نفوذناپذیر وجود ندارد. یک مخزن آب شور در نتیجه نفوذ آب نمک از کفه خیرآباد در منطقه گل‌گهر در مرکز، گسترش پیدا کرده که این آب شور مزاحم، با آب زیرزمینی شیرین کم ژرف‌تر مخلوط شده است. حیدری‌نژاد و همکاران (Heidari-Nejad et al., 2017) به ارزیابی منشأ آب نشی در معدن ۱ گل‌گهر پرداختند. نتایج آنالیزهای ایزوتوپی نشان داد که آب شور کفه خیرآباد با غنی‌شدگی زیاد نسبت به سایر نمونه‌ها جدا شده است. آن‌ها با بررسی مقدار غنی‌شدگی ایزوتوپ پایدار اکسیژن-۱۸ در برابر شوری و همچنین محاسبه درصد اختلاط به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های آب کفه نمکی خیرآباد و آب‌های زیرزمینی پیت معدن ۱، منشاهای متفاوتی با یکدیگر دارند. بررسی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی نیز نشان داد که ارتباط بین دریاچه خیرآباد و معدن به وسیله سازندهای نفوذپذیر و یا نهشته‌های آبرفتی با نفوذپذیری کم قطع شده است. یافته‌های عصاره (Assari, 2019) نشان داد که معدن ۳ گل‌گهر (گهرزمین) دارای دست‌کم دو آبخوان آبرفتی و یک سازند سخت است که ارتباط هیدرولیکی آبخوان‌ها محدود می‌باشد و تنها از طریق گسل امکان‌پذیر است. این ارتباط به مخلوط شدن آب‌های مختلف با پارامترهای هیدروشیمی مجزا انجامیده است و هیچ‌گونه ارتباط بین کفه خیرآباد با آبخوان سازند سخت موجود در پیت ندارد؛ همچنین آبخوان آبرفتی ممکن است ارتباط محدودی با کفه خیرآباد داشته باشد. مکنونی (Maknoui et al., 2018) با استفاده از معرفی یک اندیس جدید به نام اندیس تشابه به شباهت‌های هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه گل‌گهر پرداخت و نتیجه گرفت که بخشی از اختلاط آب‌های زیرزمینی منطقه، به ویژه در معدن شماره یک، مربوط به حوضه آبریز خاوری منطقه به نام چاه‌دراز می‌باشد. در تکمیل این روند، پژوهشی دیگر با استفاده از روش AHP و تحلیل داده‌های ایزوتوپی و ژئوفیزیکی این اختلاط آبی در سازند سخت گل‌گهر تایید شد (Maknoui et al., 2018).

این مطالعه با هدف تعیین منشأ شوری آب زیرزمینی معدن ۲ گل‌گهر سیرجان با استفاده از روش‌های نگاهت خودسازمان‌ده، تحلیل خوشه‌ای و هیدروشیمی انجام شده است تا بتواند نقش هیدروژئولوژی را در زهکشی معدن شماره ۲ گل‌گهر تاثیرگذارتر کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و زمین‌شناسی

معدن گل‌گهر یکی از بزرگ‌ترین کانسارهای آهن شناخته شده در خاورمیانه است که در بخش جنوب خاوری پهنه سندج - سیرجان و در حدود ۶۰ کیلومتری جنوب باختر شهر سیرجان قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه، در گستره طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۲۴ دقیقه خاوری و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۷ دقیقه شمالی واقع شده است. کانه‌زایی آهن بیشتر به صورت مگنتیتی در سنگ‌های دگرگونی پالئوزویک رخ داده است (شکل ۱).

در این گستره رودخانه دائمی وجود ندارد. آب و هوای منطقه نیمه‌خشک تا خشک با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم است. آب در بسیاری از مواقع سال از چشمه‌ها، قنات‌ها و چاه‌ها در دسترس است. بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک گل‌گهر، کمینه دمای هوای منطقه در زمستان منفی ۱۶ درجه سانتی‌گراد و بیشینه دما تا ۴۰ درجه در تابستان ثبت شده است. میانگین بارش سالانه حدود ۱۴۸ میلی‌متر است که بیشتر در زمستان اتفاق می‌افتد اما پتانسیل تبخیر و تعرق سالانه زیاد (تقریباً ۲۸۵۰ میلی‌متر) است. بیشینه رطوبت نسبی در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، ۷۰ درصد ثبت شده است.

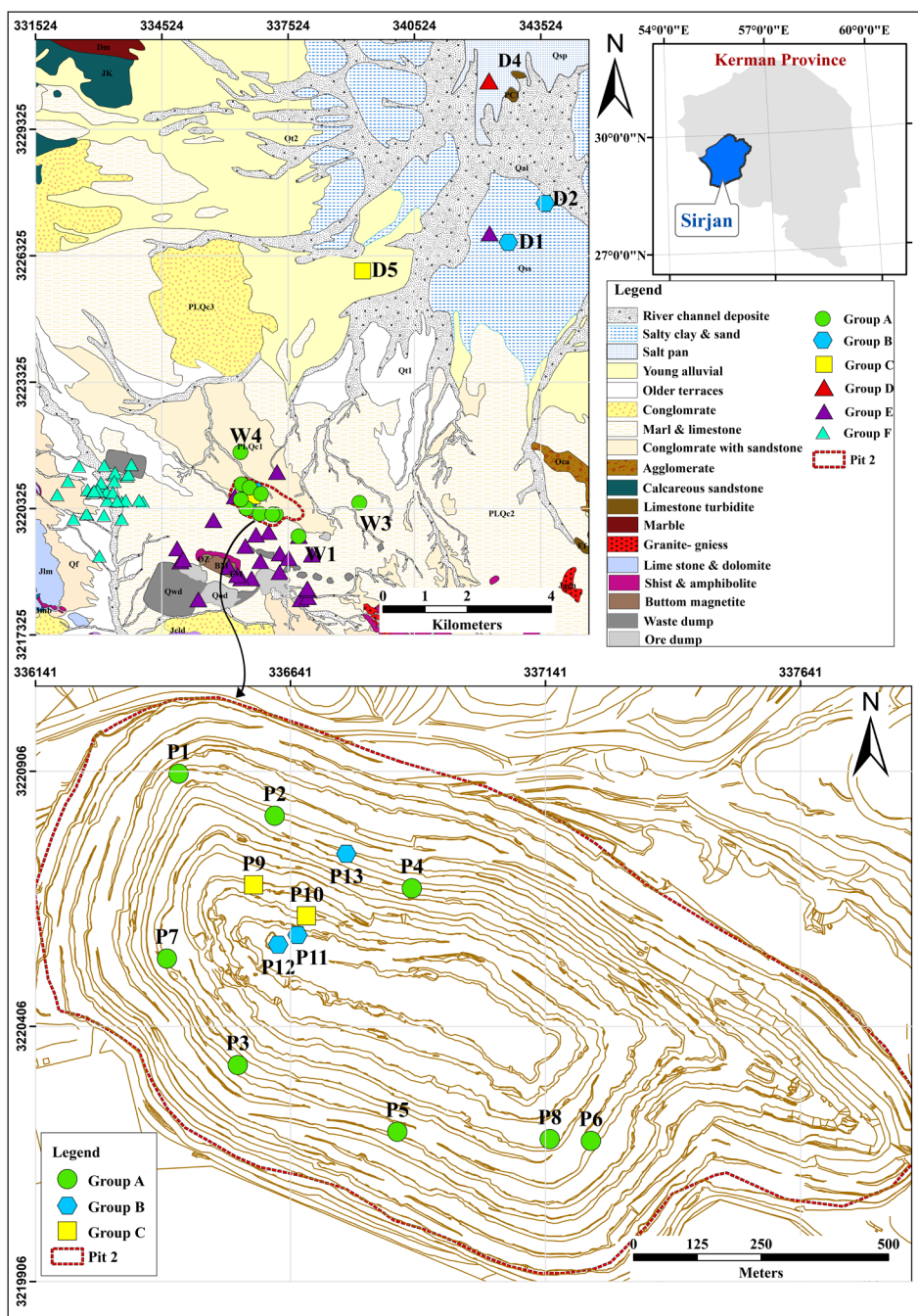
هجوم آب (Qiao et al., 2011) و از دست دادن آب را افزایش می‌دهد. مشخص کردن و شناسایی تاثیر فعالیت‌های معدنی بر تکامل هیدروژئولوژیک آبخوان‌های چند لایه دشوار است. شناخت دقیق سازوکار تکامل هیدروژئوشیمیایی سیستم‌های چند لایه برای پیش‌بینی وضعیت زیست‌محیطی، پیشگیری، به حداقل رساندن و مقابله با آلودگی آن مهم است (Rahman et al., 2022).

نمودارهای کلاسیک ارزیابی کیفیت آب مانند نمودارهای استیف (Stiff, 1951) و پایپر (Piper, 1944) اغلب به دلیل گروه‌بندی بر اساس مقایسه بصری استفاده می‌شوند، اما ارائه رده‌بندی دقیق با استفاده از روش‌های بصری چندان آسان و درست نیست. بنابراین، روش‌های آماری چند متغیره، به‌طور معمول به منظور ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی در کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شوند، به عنوان مثال، از روش‌های تحلیل خوشه‌ای، تحلیل عاملی، و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) (Orak et al., 2020; Rahman et al., 2022) نام برد. با این حال، این روش‌های چند متغیره عمدتاً مبتنی بر اصول ریاضی خطی هستند، از این رو، تنها استفاده از این روش‌ها گاهی اوقات برای طبقه‌بندی معنادار مجموعه داده‌های هیدروشیمی پیچیده کافی نیست، زیرا دارای محدودیت‌هایی در تجزیه و تحلیل سیستم‌های آب زیرزمینی پیچیده و تکامل هیدروژئوشیمی تحت اختلاط در معدن هستند (Tran et al., 2022). روش‌های تحقیق برای موثر بودن هیدروژئولوژی در معدن کاری و زهکشی زیاد است. در یکی از این روش‌ها مکنونی و همکاران (Maknoui et al., 2018) توانستند با استفاده از کاربرد هوش مصنوعی در داده‌های ژئوالکترونیک، یکی از موثرترین چاه‌های زهکشی معدن شماره یک گل‌گهر را با دبی بیش از ۶۰ لیتر در ثانیه بیابند. همچنین روش‌های پیشرفته‌تری برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های هیدروژئوشیمی به منظور تاثیر بیشتر در زهکشی معدنی که در زیر آب مجبور به عملیات معدن‌کاوی هستند، مورد نیاز است. اخیراً، با توسعه سریع هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی، مدل‌های مبتنی بر نقشه خود سازمان‌ده (Self-Organizing Map: SOM) با ویژگی‌های خودسازگار و غیرخطی به طور فزاینده‌ای برای گروه‌بندی در هیدروژئولوژی به کار گرفته شده‌اند (Nakagawa et al., 2020; Wang et al., 2023). رویکرد SOM می‌تواند برای مرتب کردن و طبقه‌بندی داده‌های چند متغیره بر اساس شباهت، در حالی که توپولوژی داده‌ها را حفظ می‌کند، استفاده شود. از آنجا که به دست آوردن تعداد مناسبی از طبقه‌بندی‌ها با استفاده از SOM می‌تواند دشوار باشد، یک مرحله خوشه‌بندی اغلب برای نورون‌های SOM، به عنوان مثال، خوشه‌بندی K-means و یا HCA اعمال می‌شود (Nguyen et al., 2015). در مقایسه با سایر روش‌های چند متغیره مانند PCA و تحلیل عاملی، SOM مزایای مختلفی مانند قابلیت‌های تجسم سطح بالا و اجرای ساده را ارائه می‌دهد، افزون بر این، SOM قادر است داده‌های از دست رفته و نقاط پرت را نیز کنترل کند. بنابراین، می‌توان روش SOM را به عنوان یک برتری شایان توجه برای مطالعات مربوط به طبقه‌بندی کیفیت آب در محیط پیچیده حوضه در نظر گرفت (Koudenoukpo et al., 2021).

یکی از مشکلات در فرایند استخراج معادن روباز، عملیات حفاری و برداشت در زیر سطح ایستایی است (Heidari-Nejad et al., 2017; Jahanshahi and Zare, 2017). معدن گل‌گهر سیرجان، یکی از بزرگ‌ترین کانسار آهن شناخته شده در خاورمیانه که شامل ۶ بی‌هنجاری آهن عمده به ظرفیت زمین‌شناسی ۱/۳ میلیارد تن سنگ آهن مگنتیتی و هماتیت است. شناخت ویژگی‌های هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی در اطراف معدن ۲ گل‌گهر سیرجان با هدف ارائه راهکار اجرایی خشک‌اندازی کاواک معدن، از موارد اصلی مدیریت منابع آب زیرزمینی اطراف معدن ۲ است. شناخت منشأ اصلی تغذیه آب زیرزمینی، منشأ شوری در اطراف معدن ۲ گل‌گهر و جهت جریان و هیدروژئولوژی سیستم با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمی می‌تواند کمک شایانی به رفع مشکلات ناشی از نشت آب زیرزمینی به کاواک معدن کند. کفه نمکی گسترده‌ای با نام خیرآباد در سمت شمال پیت معدن ۲ گل‌گهر وجود دارد. تصور اولیه این است که منشأ شوری پیت معدن ۲ و به طور کلی محدوده

دگرگونی شامل سنگ‌های فیلیت، شیست، آمفیبولیت، گنایس، مارن و سایر سنگ‌های دگرگونه‌ای است که همراه با گرانیت همزمان با زمین‌ساخت در منطقه مشاهده می‌شود (Sabzehei et al., 1997). در منطقه معدنی گل‌گهر شش توده معدنی بزرگ سنگ آهن شناخته شده است. کانسنگ اصلی بیشتر از نوع مگنتیت است که عمده تفاوت بی‌هنجاری‌ها با یکدیگر در مقدار عناصر فرعی است. زمین‌شناسی سطحی در این منطقه به‌طور عمده از نهشته‌های آبرفتی جوان است و شامل رسوبات تحکیم یافته و کنگلومرا، همراه با لایه‌های رس و سیلت با سن کوتاه‌تری است.

در اطراف منطقه گل‌گهر چند پلایا از جمله پهنه نمکی خیرآباد که نقش سطح اساس محلی را دارند به همراه ارتفاعات محدود دیده می‌شود (شکل ۱). فرورفتگی خیرآباد یا سیرجان که یک پلایا به‌شمار می‌رود، در حال حاضر محل تجمع سیلاب‌های فصلی است. این کفه نمکی بر اثر عملکرد پهنه گسلی شمالی-جنوبی (گسل گل‌گهر) که احتمالاً ماهیت پی سنگی داشته به وجود آمده است. کوه‌های با ارتفاع متوسط و بلند در شمال و جنوب گستره مورد مطالعه قرار گرفته است. سنگ‌های تشکیل دهنده گستره معدنی گل‌گهر، بیشتر به صورت مجموعه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی و نقاط نمونه‌برداری گروه A (آبخوان آبرفتی)، گروه B (اختلاطی)، گروه C (آبخوان سازند سخت)، گروه D (شورابه کفه نمکی خیرآباد)، گروه E (Maknooni, 2018) و گروه F (Assari, 2019) در معدن گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد.

Figure 1. Geographical location, geology and sampling points of group A (alluvial aquifer), group B (mixed), group C (Hard rock aquifer), group D (Kheirabad salt pan brine), group E (Maknooni, 2018) and group F (Assari, 2019) in Sirjan Golgohar mine and Kheirabad salt pan.

۲-۲- نمونه‌برداری آب زیرزمینی و سنجش شیمیایی

برای جمع‌آوری نمونه‌هایی که معرف شرایط درجای (In situ) منابع آب به ویژه آب‌زیرزمینی باشند و نیز به حداقل رساندن تغییرات در شیمی نمونه‌های آب در طی جمع‌آوری و حمل و نگهداری، نمونه‌برداری مطابق با رهنمودهای (USEPA 2007) و (APHA 2017) انجام شده است. اندازه‌گیری صحرایی شامل سنجش پارامترهای هدایت الکتریکی (EC)، pH و دما در محل به وسیله دستگاه پرتابل HACH eq آمریکایی صورت گرفته است (جدول ۲). نمونه‌های آب‌زیرزمینی به صورت روزانه از محل‌های از قبل تعیین شده برداشت و در بطری‌های پلی اتیلن با حجم ۵۰۰ سی‌سی جمع‌آوری و برچسب‌گذاری شد. پیش از نمونه‌برداری، ظروف نمونه‌برداری با آب مقطر و سپس چند بار با آب در نقاط نمونه‌برداری شسته شد. تمام نمونه‌های آب‌زیرزمینی پیش از آزمایش در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌های جمع‌آوری شده سریع به آزمایشگاه آب و روغن شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر برای سنجش کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی ارسال شدند. غلظت کاتیون‌ها توسط اسپکتروفتومتر جذب اتمی شعله‌ای (flame atomic absorption spectrophotometer) و آنیون‌ها به وسیله کروماتوگرافی یونی اندازه‌گیری شد. صحت آنالیز شیمیایی برای هر نمونه به وسیله محاسبه خطای تعادل بار (Charge Balance Error (CBE)) تعیین شده است که این مقدار CBE برای نمونه‌ها کمتر از ۵ درصد و قابل قبول بود.

به منظور بررسی تعیین منشأ آب پیت معدن ۲ گل‌گهر سیرجان، در اسفند ماه ۱۴۰۰ از ۲۰ منبع آبی نمونه برداری شده است. با در نظر داشتن وسعت زیاد گستره معدن گل‌گهر و کفه نمکی خیرآباد، نقاط نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شدند که نشان دهنده روند تغییرات کیفی منابع آب‌زیرزمینی باشند. بخش اول (P) شامل منابع نمونه‌برداری شده از درون پیت معدن ۲ گل‌گهر، بخش دوم (W) مربوط به چاه‌های اطراف معدن و بخش سوم (D) شامل نمونه برداری آب در مسیر و کفه نمکی خیرآباد است که در سمت شمال پیت معدن ۲ واقع شده است، می‌باشد (جدول ۱). نقاط نمونه‌برداری شامل ۱۱ نقطه آب‌زیرزمینی ورودی به پیت معدن ۲ گل‌گهر، ۳ چاه مشاهده‌ای و ۴ نقطه در سمت کفه نمکی خیرآباد می‌باشد. این ۱۱ نقطه شامل چشمه، حوضچه تجمع آب در کف پیت و یک چاه آرتزین (نمونه P10) می‌باشد. نمونه‌های D1 و D2 مربوط به آب‌زیرزمینی هستند که به ترتیب از ایجاد گودال و کانال به سطح زمین راه یافته و به صورت راکد در این محل‌ها وجود دارند. نمونه D4 مربوط به آب دریاچه کفه خیرآباد است. نمونه D5 نیز مربوط به آب برگشتی آبخوان سنگ سخت از پیت معدن ۳ است که در یک محل جمع شده است. داده‌ها به صورت گروه A، گروه B، گروه C و گروه D و مطالعات پیشین به صورت گروه E (Maknooni, 2018) و گروه F (Assari, 2019) دسته‌بندی شده‌اند (شکل ۱).

جدول ۱- مشخصات منابع آب زیرزمینی و سطحی نمونه‌برداری شده در معدن گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد.

Table 1. Sampling point features located in the Golgohar Sirjan mine and Kheirabad salt pan.

Group	Sampling point	Type	Categorical	Cordinate	Water type
Group A	P1	Seepage face	Pit area	40R 336421 3220901	Na-Cl
	P2	Seepage face	Pit area	40R 336750 3220744	Na-Cl
	P3	Seepage face	Pit area	40R 336537 3220330	Na-Cl
	P4	Seepage face	Pit area	40R 336879 3220677	Na-Cl
	P5	Seepage face	Pit area	40R 336850 3220199	Na-Cl
	P6	Seepage face	Pit area	40R 337230 3220182	Na-Cl
	P7	Seepage face	Pit area	40R 336398 3220539	Na-Cl
	P8	Seepage face	Pit area	40R 337149 3220185	Na-Cl
Group B	W1	Well	Surrounding well	40R 337773 3219663	Na-Cl
	W3	Well	Surrounding well	40R 339214 3220458	Na-Cl
	W4	Well	Surrounding well	40R 336392 3221662	Na-Cl
	P12	Sump	Pit area	40R 336617 3220566	Na-Cl
Group C	P13	Seepage face	Pit area	40R 336750 3220744	Na-Cl
	D1	Drain	Salt pan	40R 342756 3226645	Na-Cl
	D2	Drain	Salt pan	40R 343634 3227570	Na-Cl
	P9	Seepage face	Pit area	40R 336569 3220683	Na-Cl
Group D	P10	Artesian well	Pit area	40R 336672 3220623	Na-Cl
	D5	Drainage outlet	Salt pan	40R 339292 3225965	Na-Cl
Group D	D4	Kheirabad Salt pan	Salt pan	40R 342297 3230474	Na-Cl

جدول ۲- پارامترهای فیزیکوشیمیایی اندازه گیری شده در محل و آزمایشگاه.

Table 2. Physicochemical parameters measured in situ and laboratory.

Group		CBE	EC	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺
		%	(m moh/cm)	(meq/L)							
Group A	Mean	-1.305	16.3	7.18	149.84	49.20	1.67	67.90	105.09	0.31	20.94
	Max	3.81	25.8	7.70	295.33	83.30	3.28	121.92	171.04	0.51	42.29
	Min	-4.6	8.17	6	59.20	7.76	0.70	19.85	51.39	0.20	12.05
	SD	2.87	5.53	0.62	72.2	18.3	0.6	28.3	36.6	0.1	12.4
Group B	Mean	-1.13	62.6	7.34	807.52	72.29	1.16	213.99	553.88	1.39	91.10
	Max	2.86	76.1	7.60	1041.16	127.84	1.49	312.79	739.01	1.98	134.23
	Min	-4.71	43.5	7.2	532.2	35.26	0.75	122.55	278.84	0.53	66.51
	SD	2.74	12.19	0.1	196.55	39	0.6	71	163.9	0.5	23
Group C	Mean	-0.116	127.3	6.67	1968.04	14.18	0.71	38.34	1089.98	3.73	145.42
	Max	1.83	140.3	7.20	2251.96	25.04	0.94	884.33	1244.71	5.73	217.39
	Min	-1.65	128	6.30	1646.6	7.98	0.5	638.9	858.9	2.21	86.12
	SD	1.45	10.91	0.38	248.5	7.7	0.18	105.4	166.1	1.41	54.3
Group D	-	-2.94	526	5.8	8311.6	28	1.57	2328.2	4862.2	24.7	647.53

۲-۳- روش‌شناسی

است (Richter et al., 1991; Appelo and Postma, 2005). نسبت Ca^{2+}/SO_4^{2-} را می‌توان به عنوان نشانگر انحلال مواد معدنی سولفاتی مثل انیدریت و ژپس استفاده کرد (Gharaat et al., 2022). حلالیت ژپس به ویژه در حضور هالیت و یون‌های متقابل، بیشتر از انیدریت است. در این تناسب خط ۱:۱ انحلال ژپس را نشان می‌دهد. اگر نسبت $HCO_3^-/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$ مقدار ۲:۱ باشد، منبع اصلی Ca^{2+} در آب‌های زیرزمینی انحلال کلسیت است. با این حال، وقتی این نسبت کمتر از ۴:۱ باشد، آب زیرزمینی احتمالاً مقدار قابل توجهی دولومیت را حل کرده است. نمودارهای ترکیبی (Composition diagram) کاتیون‌های اصلی با استفاده از Microsoft Excel 2019 انجام شده است.

نقشه خودسازمان‌ده (Self-Organizing Map (SOM) (Kohonen, 1982)، یکی از روش‌های هوش مصنوعی بدون نظارت است که به عنوان یک روش تجزیه و تحلیل قوی و موثر برای شناسایی ویژگی داده‌ها با استفاده از تجسم و طبقه‌بندی الگو در نظر گرفته می‌شود. در این روش، داده‌های چند بعدی در فضایی با ابعاد کمتر، که معمولاً می‌تواند در دو بعد باشد، با حفظ روابط اصلی، به عنوان مثال، توپولوژی داده‌ها، پیش‌بینی می‌شود.

SOM دارای دو لایه مانند خروجی و ورودی در ساختار خود است که این لایه‌ها از نورون‌ها یا واحدهای نقشه تشکیل شده‌اند. بردارهای وزن (سیناپس‌ها) لایه ورودی را به لایه خروجی (که نقشه یا لایه رقابتی نامیده می‌شود) متصل می‌کنند. در یک فرایند تکرار، SOM آموزش دیده است. هر بردار ورودی بر اساس بیشترین شباهت، گرهی را فعال می‌کند که در لایه خروجی سلول برنده خوانده می‌شود. شباهت بین دو بردار معمولاً بر اساس فاصله اقلیدسی مطابق رابطه ۱ در نظر گرفته می‌شود که اغلب به عنوان یک تفاوت قابل اندازه‌گیری است (Rahman et al., 2022).

$$D_j = \sum_{i=1}^n \|W_{i,j} - X_i\|^2 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، X_i ، i مین بردار ورودی، $W_{i,j}$ ، بردار وزنی متصل کننده ورودی i به نورون خروجی j و D_j حاصل جمع فاصله اقلیدسی بین نمونه‌های ورودی X_i و بردار وزن ارتباطی آن به زمین سلول خروجی است، که واحد نقشه خوانده می‌شود.

به منظور اجرای SOM، اندازه نقشه (تعداد نورون‌های خروجی) ضروری است. در صورتی که اندازه نقشه بیش از حد بزرگ باشد، الگوها بسیار جزئی خواهند بود،

برای شناخت سیستم آب‌زیرزمینی و یافتن فرایندهای چیره هیدروژئوشیمیایی آبخوان معدن گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد، از روش‌های هیدروژئوشیمیایی (نمودار پایپر و نمودار نسبت یونی) استفاده شد. همچنین برای بررسی و تعیین منشأ آب‌های زیرزمینی معدن ۲ گل‌گهر سیرجان، نتایج حاصل از سنجش نمونه‌ها با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA) و مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی (نقشه خودسازمان‌ده) تفسیر شد. نسبت یون‌های اصلی را می‌توان برای تجزیه و تحلیل غلظت عناصر اصلی مختلف و روابط متقابل آنها و برای درک و نشان دادن فرایندهای هیدروژئوشیمیایی و منشأ ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی استفاده کرد (Wang et al., 2014). نمودار پایپر (Piper, 1944) یکی از مفیدترین نمایش‌های گرافیکی در مطالعات کیفیت آب‌های زیرزمینی است که به درک ژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی کم عمق کمک می‌کند. تکامل ژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی را می‌توان با ترسیم غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی در نمودار پایپر درک کرد (Chidambaram et al., 2011). نرم افزار AqQA برای مشخص کردن رخساره‌های هیدرووشیمیایی به کار گرفته شد. ابزار ArcGIS و Surfer 16 استفاده شدند تا توزیع فضایی EC و روند تغییرات مکانی آب در دو محدوده پهنه نمکی و پیت ۲ نشان داده شوند.

نمودارهای ترکیبی Na^+/Cl^- در برابر Cl^- ، K^+/Cl^- در برابر Cl^- ، Mg^{2+}/Cl^- در برابر Cl^- ، HCO_3^- در برابر $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ ، SO_4^{2-} در برابر Ca^{2+} ، $Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$ در برابر Na^+-Cl^- مورد استفاده قرار گرفتند. از اصلی‌ترین کاربرد نمودارهای ترکیبی شناخت فرایندهای ژئوشیمی موثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌باشد. نمودار Na^+/Cl^- در برابر Cl^- به طور گسترده‌ای برای شناسایی سازوکار شوری استفاده شده است (Steinmetz et al., 2018). انحلال هالیت غلظت‌های مولی برابر Cl^- و Na^+ را در محلولی آزاد می‌کند که در آن نسبت معادل Na^+/Cl^- به دلیل انحلال هالیت تقریباً برابر با ۱ است. نسبت بیشتر از ۱ به دلیل هوازگی و انحلال فرایندهای سیلیکات سدیم و یا تبادل کاتیونی مستقیم رخ می‌دهد. نمودار نوع آب غنی از کلر اندکی زیر خط ۱ است که نشان‌دهنده حذف جزئی Na^+ است. این مورد می‌تواند به سبب جایگزینی با کلسیم و یا منیزیم باشد که نتیجه نفوذ آب شور و فرایند تبادل کاتیونی معکوس

است که برای گروه‌بندی متغیرها و تشخیص گروه‌های همگن مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که روش آماری چند متغیره امکان بررسی همزمان چندین متغیر را فراهم می‌کند، ابزار مناسبی در بررسی و تفسیر روابط بین متغیرها به شمار می‌آید. آنالیز خوشه‌ای الگوریتم Hierarchical با شاخه‌های متفاوت، برای طبقه‌بندی نمونه‌ها بر پایه شباهت‌ها و تفاوت‌های ژئوشیمیایی به کار گرفته شده است. در این مقاله برای تهیه مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی (نقشه خودسازمان‌ده) از نرم افزار MATLAB طبق روش ارائه شده توسط لی و همکاران (Li et al., 2020) و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA) همراه با نقشه حرارتی (Heat map) از بسته نرم افزار OriginPro 2022b استفاده شد.

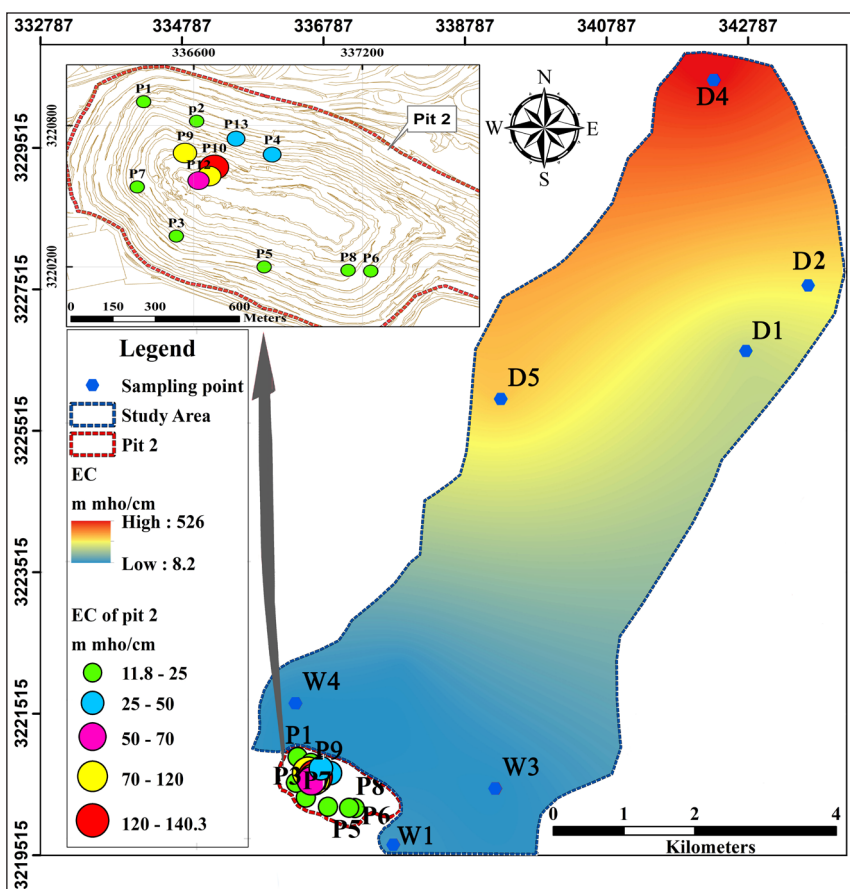
۳- داده‌ها و اطلاعات

پارامترهای فیزیکی و شیمیایی، غلظت یون‌ها و پارامترهای آماری نمونه‌های آب جمع آوری شده در اسفند ۱۴۰۰، در جدول ۲ نشان داده شده است. pH نمونه‌های آب‌زیرزمینی بین ۵/۸ تا ۷/۷ است که اسیدی تا خنثی دانسته می‌شود. هدایت الکتریکی (EC) به عنوان یک نمایانگر شوری، بین ۸/۱ تا ۵۲۶ میلی‌مhos بر سانتی‌متر است. بیشترین مقدار EC برای نمونه D4 در کفه نمکی می‌باشد. حدود ۹۵/۳ درصد نمونه‌ها دارای EC بالای ۱۰ میلی‌مhos بر سانتی‌متر هستند. EC نمونه‌های کفه نمکی بالاتر از محدوده بیت و گمانه‌ها است که این نشان می‌دهد شوری آب‌زیرزمینی در محدوده کفه نمکی بیشتر از بیت است. شکل ۲ نقشه توزیع EC در محدوده کفه نمکی خیرآباد و بیت ۲ را نشان می‌دهد. شورش‌دگی بیشتر کفه نمکی خیرآباد ممکن است به دلیل انحلال هالیت، حضور نهشته‌های دریاچه‌ای تبخیری و تبخیر شدید در محدوده کفه نمکی باشد.

و اگر اندازه نقشه خیلی کوچک باشد، الگوها خیلی کلی در نظر گرفته می‌شوند و ممکن است برخی از تفاوت‌های خاص شناسایی نشوند (Tsuchihara et al., 2020; Nakagawa et al., 2020). با این حال، هیچ قانون ثابت و سریعی برای تشخیص اندازه نقشه وجود ندارد.

برای به دست آوردن طبقه‌بندی معنادار نمونه‌های آب از نقشه گره SOM باید آن‌ها را به صورت دستی بر اساس ماتریس فاصله یکپارچه با استفاده از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA) (Koudonoukpo et al., 2021) یا آنالیز خوشه‌ای K-means دسته‌بندی کرد. برای خوشه‌بندی نقشه گره SOM، بردارهای وزن گره مورد استفاده برای ایجاد SOM می‌توانند به عنوان ورودی برای تجزیه و تحلیل خوشه استفاده شوند و مرزها را می‌توان روی نقشه برای شناسایی خوشه‌ها رسم کرد (Farsadnia et al., 2014). در این پژوهش از روش تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA) برای خوشه‌بندی نقشه گره SOM استفاده شده است.

شیوه شماره‌گذاری نوروها از پایین سمت چپ شروع می‌شود و به صورت سطری ادامه پیدا می‌یابد. در این مطالعه، داده‌های هیدروژئوشیمی ۲۰ نمونه آب‌زیرزمینی با استفاده از SOM مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تعداد ۹ شاخص هیدروژئوشیمی (EC، Na⁺، K⁺، Ca²⁺، Mg²⁺، Cl⁻، SO₄²⁻، HCO₃⁻، pH) در محاسبه SOM در نظر گرفته شد. تمام داده‌های هیدروژئوشیمی پیش از تجزیه و تحلیل با استفاده از SOM به‌نچار شدند. تعداد نوروها در شبکه عصبی با استفاده از روش ابتکاری پیشنهاد شده توسط ویسانتو و آلهونی (Vesanto and Alhoniemi, 2000)، $M=5\sqrt{\text{number of samples}}$ (که M عدد تعداد نوروهاست) محاسبه شد؛ بنابراین ۲۵ (۵×۵) نورو خروجی در این مطالعه انتخاب شد. سپس غلظت‌ها بر حسب میلی‌اکی والان بر لیتر وارد شدند. تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA) یکی از روش‌های آماری چند متغیره

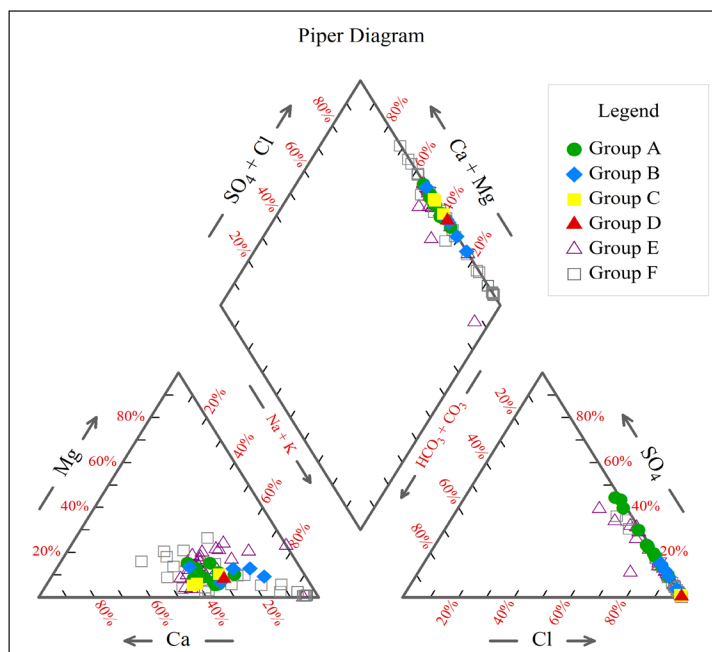


شکل ۲- نقشه تغییرات هدایت الکتریکی آب‌زیرزمینی در گستره بیت معدن ۲ گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد.

Figure 2. Variational map of electrical conductivity of groundwater in the Sirjan Golgohar mine and Kheirabad salt pan.

تمام نمونه‌های آب زیرزمینی رخساره شورابه را نشان می‌دهند و نمونه‌ها روی Saline water از نمودار پایپر قرار گرفته‌اند. بر اساس نمودار پایپر (شکل ۳) نوع آب تمام نقاط نمونه برداری گروه E (Maknooni, 2018)، کلروره-سدیک می‌باشد. گروه F (Assari, 2019) که مربوط به بخش مرکزی پیت معدن گهر زمین (معدن شماره ۳ گل‌گهر) است هم دارای نوع آب Na-Cl می‌باشد اما به سمت لبه‌های پیت، نوع آب به Ca(Na)-Cl و در نهایت Ca-Cl تغییر می‌کند که می‌تواند نتیجه اختلاط آب تازه و آب شور از آبخوان آبرفتی و آبخوان سنگ سخت باشد.

مقدار یون‌های اصلی، ویژگی‌های ژئوشیمیایی آب زیرزمینی در یک محدوده معین را تخمین می‌زند. ترتیب کاتیونی $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ است در حالی که ترتیب آنیونی $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ در هر چهار گروه A تا D می‌باشد. نمودار پایپر می‌تواند محتوای نسبی یون‌های اصلی در نمونه‌های مختلف آب را آشکارا توصیف کند و شباهت یا تفاوت‌ها در انواع هیدروشیمیایی را با موقعیت‌های توزیع نسبی نمونه‌های آب تعیین نماید. بر طبق شکل ۳، رخساره هیدروژئوشیمی مشاهده شده در محدوده معدن و کفه خیرآباد (در هر چهار گروه طبقه‌بندی شده)، Na-Cl است و



شکل ۳- نمودار پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی گستره معدن گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد. گروه A (آبخوان آبرفتی)، گروه B (اختلاطی)، گروه C (سازندی)، گروه D (شورابه کفه نمکی خیرآباد)، گروه E (Maknooni, 2018) و گروه F (Assari, 2019).

Figure 3. Piper diagram of the Golgohar Sirjan mine and Kheirabad salt pan groundwater and surface water samples. group A (alluvial aquifer), group B (mixed), group C (Hard rock aquifer), group D (Kheirabad salt pan brine), group E (Maknooni, 2018) and group F (Assari, 2019).

۸۶/۱۵ تا ۱۲۵۰/۴۴ meq/L Mg^{2+} و غلظت Ca^{2+} از ۲۱۷/۳۹ تا ۸۶/۲۲ meq/L متغیر است. برای آنیون‌ها، غلظت Cl^- از ۱۶۴۶/۶۸ تا ۲۲۵۱/۹۶ meq/L از SO_4^{2-} از ۷/۹۸ تا ۲۵/۰۴ meq/L متغیر است و دارای نوع آب Na-Cl می‌باشد. تنها نمونه D4 در گروه D قرار می‌گیرد که مربوط به نمونه واقع در پهنه نمکی خیرآباد است و دارای نوع Na-Cl است. برای کاتیون‌ها، غلظت Ca^{2+} از ۲۳۲۸/۲۳ meq/L، $Na^+ + K^+$ از ۴۸۸۶/۹۹ meq/L و غلظت Mg^{2+} از ۶۴۷/۵۳ meq/L و آنیون‌ها نیز، غلظت Cl^- از ۸۳۱۱/۶ meq/L و SO_4^{2-} از ۲۸/۰۸ meq/L است.

۳-۱-۱ فعل و انفعالات آب و سنگ

ضرایب نسبت یون‌های اصلی بیشتر برای شناسایی فرایندهای هیدروشیمیایی اساسی استفاده می‌شود (Wu et al., 2014). ویژگی‌های شیمیایی آب زیرزمینی به تغییرات فاکتورهای طبیعی و انسان ساز مثل ترکیبات آب تغذیه و فعل و انفعالاتش با کانی‌ها

۵۵ درصد نمونه‌های آب در گروه A قرار گرفته‌اند. توالی کاتیون‌ها در گروه A، غلظت Ca^{2+} از ۱۹/۸۵ تا ۱۲۱/۹۲ meq/L غلظت $Na^+ + K^+$ از ۵۱/۷۲ تا ۱۶۴/۳۹ meq/L و غلظت Mg^{2+} از ۸/۰۱ تا ۴۲/۲۹ meq/L متغیر است. برای آنیون‌ها نیز، غلظت Cl^- از ۵۹/۲ تا ۲۹۵/۳۳ meq/L از SO_4^{2-} از ۷ تا ۸۳/۳ meq/L و غلظت HCO_3^- به طور کلی در منطقه بسیار کم و کمتر از ۱ meq/L است و نوع آب Na-Cl می‌باشد. ۲۵ درصد نمونه‌ها در گروه B واقع شده‌اند و دارای نوع آب Na-Cl هستند. تغییرات هدایت الکتریکی در این گروه از ۴۳/۵ تا ۷۶/۱ m mho/cm است. برای کاتیون‌ها، غلظت Ca^{2+} از ۱۲۲ تا ۳۱۲ meq/L غلظت $Na^+ + K^+$ از ۲۷۹ تا ۷۴۰/۹۹ meq/L و غلظت Mg^{2+} از ۶۶/۵۱ تا ۱۳۴/۲۳ meq/L متغیر است. برای آنیون‌ها، غلظت Cl^- از ۵۳۲/۲۵ تا ۱۰۴۱/۱۶ meq/L از SO_4^{2-} از ۳۵/۲۶ تا ۱۲۷/۸۴ meq/L و غلظت HCO_3^- به طور کلی در منطقه کمتر از ۱ meq/L است. ۱۵ درصد نمونه‌ها در گروه C قرار گرفته‌اند. غلظت Ca^{2+} از ۶۳۸/۹۸ تا ۸۸۴/۳۳ meq/L غلظت $Na^+ + K^+$ از

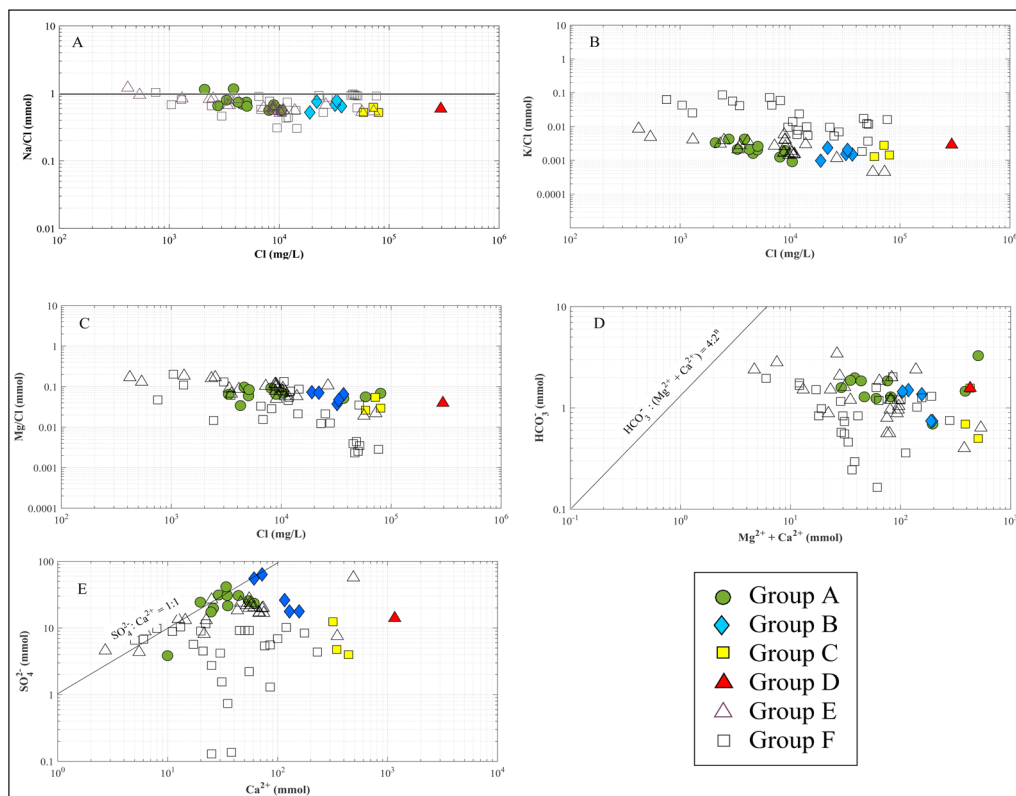
زمانی که این نسبت یک طرفه باشد و رابطه ۲ به سمت چپ باشد، انحلال کانی‌های حامل سدیم و یا فرایند تبادل کاتیونی رخ می‌دهد.

نسبت مولی K^+/Cl^- و Mg^{2+}/Cl^- در برابر غلظت کلر (شکل‌های ۴-B، C) نشان می‌دهد که ۶ نمونه از گروه A (نمونه‌های W3، W4، W1) که مربوط به گمانه‌های اطراف پیت ۲ هستند) و نمونه‌های P1، P2، P8 (سطوح نشت واقع در پیت معدن ۲) که دارای هدایت الکتریکی کمتری نسبت به سایر نمونه‌های هر ۴ گروه هستند، به ترتیب نسبت K^+/Cl^- و Mg^{2+}/Cl^- بیشتری دارند؛ این نشان می‌دهد که جامدات حل شده از آب در این نقاط بیشتر وابسته به هوازدگی کانی‌های سیلیکاته هستند که در این نواحی وجود دارند تا انحلال مواد رسوبی که در اطراف کفه هست و یا آب‌زیرزمینی که از نواحی پهنه نمکی انتقال یافته‌اند. به بیان دیگر، دو گروه C و D که شوری بسیار بیشتری نسبت به سایر گروه‌ها دارند، نسبت K^+/Cl^- و Mg^{2+}/Cl^- کمتری نیز دارند. با این حال نتایج حاصل از گروه E و گروه F با نتایج به دست آمده از مطالعه فعلی مشابه است.

با توجه به نمودار HCO_3^- در برابر $Mg^{2+}+Ca^{2+}$ (شکل ۴-D)، در صورتی که حضور این کاتیون‌ها نتیجه انحلال کلسیت یا دولومیت باشد، روند تغییرات نقاط باید بر روی خط ۲:۱ باشد. اگرچه این یک روند کلی است و برای این منطقه نیست، $Mg^{2+}+Ca^{2+}$ یک روند منفی دارد و نشان می‌دهد که منشاهای دیگری از کلسیم یا منیزیم به درون آب‌زیرزمینی معرفی می‌شوند، به عبارتی دیگر، نشان‌دهنده ورود کلسیم به محیط بوده و یا کلسیم جایگزین سدیم شده است (کلسیم زیاد در محیط ناشی از جایگزینی با سدیم است). بنابراین در هر ۴ گروه (A تا D) و مطالعات پیشین (E و F) انحلال کلسیت یا دولومیت رخ نداده است و انحلال ژیس یا فرایند تبادل کاتیونی معکوس می‌تواند Ca^{2+} و Mg^{2+} به درون آب‌زیرزمینی وارد کند. این نشان می‌دهد که انحلال کانی‌های کربناته تأثیری در ترکیبات هیدروژن‌شیمی نمونه‌ها ندارد.

و ماتریکس سنگ، ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان (زمان ماندگاری)، تبخیر و تعرق و مخلوط شدن با نفوذ فاضلاب فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی وابسته است (Zaryab et al., 2021).

به منظور بررسی الگوی متفاوت تغییرات غلظت یون‌ها و بررسی منشأ آزاد شدن به درون آب‌زیرزمینی، نسبت مولی جفت یون‌های مختلف محاسبه شده است. سدیم و کلر، کاتیون و آنیون اصلی چیره در بیشتر نمونه‌های آب زیرزمینی بوده‌اند (جدول ۲) که در آن یک رابطه خطی قوی بین Na^+ و Cl^- ($R^2 > 0.9$) و نشان از منبع مشترک وجود دارد. رابطه بین نسبت Na^+/Cl^- در برابر کلر (شکل ۴-A) نشان می‌دهد تمام نمونه‌های واقع در گروه‌های A، B، C، D، E و F در نزدیکی خط ۱ (انحلال هالیت) قرار گرفته‌اند. در صورتی که نسبت Na^+/Cl^- در برابر غلظت کلر در حوالی خط ۱ باشد، حضور این یون‌ها به دلیل انحلال هالیت است. دو نمونه واقع در گروه A (نمونه‌های W1 و W3 که مربوط به گمانه‌های اطراف پیت ۲ است) در بالای خط ۱ قرار دارد که برای بالا بودن نسبت Na^+/Cl^- این دو نمونه می‌توان این گونه استنباط کرد که غلظت اضافی Na^+ می‌تواند به دلیل هوازدگی و یا تبادل کاتیونی مستقیم رخ دهد در سایر گروه‌های C، B و D نسبت Na^+/Cl^- زیر ۱ می‌باشد و نشان می‌دهد که افزون بر انحلال هالیت، سدیم از آب حذف شده که این می‌تواند به دلیل جایگزینی با کلسیم و یا منیزیم باشد که نتیجه نفوذ آب شور و فرآیند تبادل کاتیونی معکوس است. به عبارت دیگر، سدیم از محیط خارج شده و کلسیم به جای آن از رسوبات وارد آب‌زیرزمینی شده است. لازم به یادآوری است که با توجه به منشأ گروه C (آب سازندی) و گروه D (شورابه کفه نمکی خیرآباد) نشان می‌دهد این دو گروه افزون بر انحلال هالیت، به ترتیب تحت تأثیر شورابه‌های در عمق و یا انحلال نمک از کفه نمکی خیرآباد هستند. از آنجایی که کلر یک یون پایستار است، یکی از دلایل کاهش این نسبت می‌تواند تبادل کاتیونی معکوس باشد که عبارت است از:



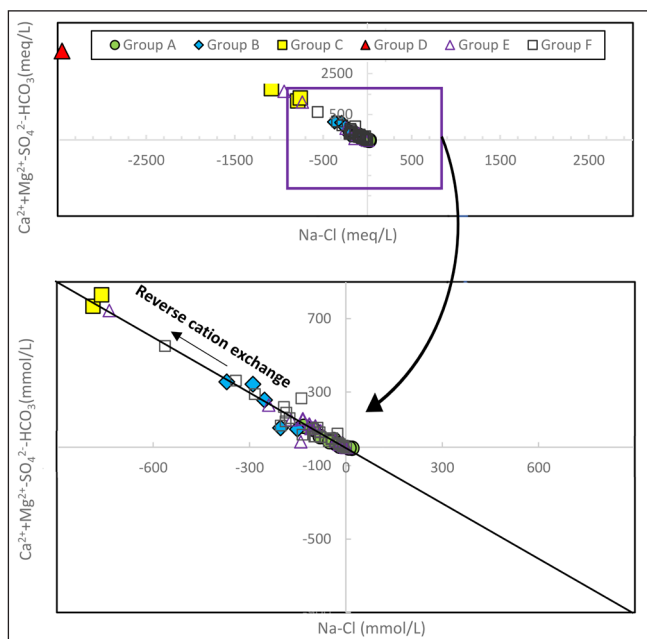
شکل ۴- نمودارهای دو متغیره Na^+/Cl^- در برابر Cl^- ، K^+/Cl^- در برابر Cl^- ، Mg^{2+}/Cl^- در برابر Cl^- ، HCO_3^- در برابر $Mg^{2+}+Ca^{2+}$ و SO_4^{2-} در برابر Ca^{2+} .

Figure 4. Scatter plots of major ions, Na^+/Cl^- , K^+/Cl^- , and Mg^{2+}/Cl^- vs. Cl^- . HCO_3^- vs. $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ and SO_4^{2-} vs. Ca^{2+} .

این محدوده رخ داده باشد. نتایج نشان می‌دهند که انحلال کانی‌های سولفات منشأ اصلی کلسیم و منیزیم در آبخوان آبرفتی (گروه A و بعضی نمونه‌های گروه B، E و F) است. در حالی که کلسیم و منیزیم اضافی در نمونه‌های گروه C و D و برخی نمونه‌های گروه B، E و F از فرایندهای شیمیایی دیگر مانند فعل و انفعالات آب و سنگ می‌باشد.

شکل ۵ نمودار تبادل یونی $Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$ در برابر Na^+-Cl^- را نشان می‌دهد. هر زمان که نمونه‌های آب در نمودار یاد شده بر روی محور x نزدیک به مقدار صفر واقع شوند، نشانگر آن است که نمونه‌ها تحت تاثیر تبادل یونی قرار نگرفته‌اند و مربوط به نمونه‌های آب زیرزمینی می‌باشند. نمونه‌هایی که در امتداد خط با شیب -۱ قرار می‌گیرند و در ربع چهارم و دوم جای گرفته‌اند، نشان می‌دهد که به ترتیب فرایند تبادل کاتیونی و تبادل کاتیونی معکوس را متحمل شده‌اند. با توجه به شکل ۵، آشکارا فرآیند تبادل کاتیونی معکوس برای گروه‌های B، C، D و تعدادی از نمونه‌های گروه A رخ داده است که در امتداد خط با شیب -۱ و در ربع دوم $(y = -x)$ قرار گرفته‌اند. گروه‌های E و F نیز فرایند تبادل کاتیونی معکوس در گستره معدن گل‌گهر سیرجان را تایید می‌کند.

با توجه به رابطه بین Ca^{2+} و SO_4^{2-} (شکل E-۴) در صورتی که فقط انحلال ژپس وجود داشته باشد، نمونه‌ها باید بر روی خط ۱:۱ قرار گیرند اما همان‌گونه که دیده می‌شود، در بیشتر نمونه‌های گروه B و نمونه‌های گروه C و D آشکارا این اتفاق روی نداده است. در حالی که ۳ نمونه مربوط به گروه A (W1، W3 و P3) در بالای خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند و نشان می‌دهد که کاهش Ca^{2+} می‌تواند نتیجه تبادل یونی، دولومیتی شدن و یا رسوب کلسیت باشد. مادامی که نسبت Na^+/Cl^- بیشتر از ۱ باشد (شکل A-۴)، غلظت آزاد شدن Na^+ توسط هوازدگی سیلیکات‌ها بالا است و کاهش Ca^{2+} احتمالاً نتیجه تبادل کاتیونی با Na^+ می‌باشد، همچنین نشان می‌دهد که هم یون سولفات افزایش یافته و هم کلسیم کاهش پیدا کرده است. این افزایش سولفات می‌تواند نتیجه انحلال کانی‌های حامل SO_4^{2-} یا اکسیداسیون پیریت در کنار انحلال ژپس باشد. اکسیداسیون پیریت سبب کاهش pH در آب می‌شود، از این رو، به‌رغم این که پیریت و کالکوپیریت در کانی‌شناسی کانسار و حتی فراوری مواد آن به عنوان یک باطله (گانگ) نقش پر رنگی دارد، اما اکسیداسیون پیریت نمی‌تواند در پیت معدن ۲ گل‌گهر اتفاق افتاده باشد؛ چون pH نمونه‌ها نزدیک و یا بالای ۷ می‌باشد. بنابراین می‌تواند انحلال کانی‌های دیگر به اضافه ژپس برای



شکل ۵- نمودار $Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$ در برابر Na^+-Cl^- نشان دهنده فرایند تبادل یونی معکوس.

Figure 5. Scatter plots of $Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-$ vs. Na^+-Cl^- indicates the reverse ion exchange process.

این دندروگرام‌ها بر اساس یون‌های اصلی برای ۲۰ نمونه تهیه شده است (شکل ۶). دندروگرام‌های رسم شده، آب‌های نواحی پله‌های ابتدایی پیت معدن ۲ و گمانه‌های اطراف پیت را با آب‌های واقع شده در پله‌های انتهایی پیت معدن ۲ گل‌گهر سیرجان و نواحی کفه نمکی خیرآباد تفکیک می‌کند. بر اساس شباهت‌ها، نقاط نمونه‌برداری به ۴ گروه تفکیک شده است. در این گروه‌بندی بر اساس روش HCA نمونه‌های P1، P2، P3، P4، P5، P6، P7، P8، W1، W3، W4 در گروه A جای گرفته‌اند، این نمونه‌ها متعلق به پله‌های ابتدایی و سطوح نشئی واقع در پیت معدن ۲ گل‌گهر سیرجان و گمانه‌های اطراف پیت معدن ۲ می‌باشند. با توجه به نقشه حرارتی (شکل ۶)، کمترین غلظت پارامترهای هیدروشیمی در این گروه جای دارد. گروه B مربوط

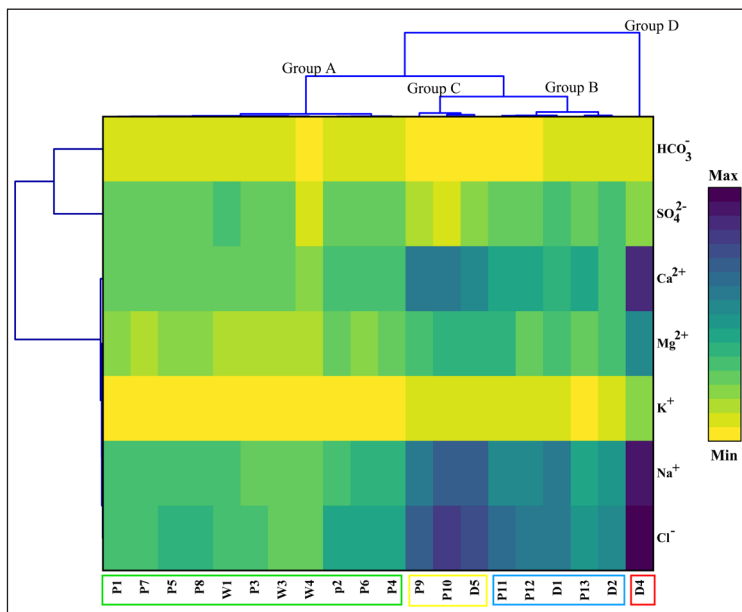
۲-۳- تعیین منشأ شوری در آب زیرزمینی معدن گل‌گهر سیرجان

۳-۱-۲- آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی

بر اساس هیدروشیمی یون‌های عمده و برای تفکیک نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه گل‌گهر و کفه نمکی خیرآباد، به منظور رسیدن به الگوهای شیمی آب زیرزمینی از نمودار خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA) استفاده شده است. تحلیل خوشه‌ای بر اساس میزان شباهت بین متغیرها، آب زیرزمینی را به تعداد محدودی خوشه دسته‌بندی می‌کند. هر خوشه حالت هیدروژئوشیمی مشابه و مشخص از آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. دندروگرام نتایج حاصل از HCA در نقشه حرارتی (شکل ۶) نشان می‌دهد که ۲۰ نمونه آب زیرزمینی در ۴ گروه اصلی متفاوت قرار گرفته‌اند.

بیشترین هدایت الکتریکی ۵۲۶ m mho/cm در گستره مورد مطالعه است. شکل ۶ نیز آشکارا غلظت بالای کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی گروه D را نشان می‌دهد. با توجه به دندروگرام که نشان‌دهنده ارتباط بین نمونه‌ها می‌باشد، منیزیم و کلسیم بیشترین شباهت را با کلر و سدیم دارند که نشان می‌دهد آب‌های زیرزمینی با فرایند تبادل کاتیونی معکوس مرتبط هستند. همچنین قرار گرفتن سدیم و کلر در یک زیرگروه، نمایانگر رخداد انحلال هالیت در منطقه است. در گروه‌های D، C، B و برخی از نمونه‌های واقع در گروه A، کلر و سدیم چیره بوده و فرایند اشباع‌شدگی یون‌ها از طریق انحلال هالیت صورت گرفته است.

به نمونه‌های P11، P12، P13، D1، D2 می‌باشد. نمونه‌های P12، P11، P13 و D2 متعلق به نمونه‌های واقع در پله‌های انتهایی پیت معدن ۲ هستند و نمونه‌های D1 و D2 منتهی به مسیر کفه نمکی خیرآباد می‌باشد. تغییرات هدایت الکتریکی در این گروه از ۴۳/۵ تا ۷۶ m mho/cm است. نمونه‌های P9، P10، P11 و D5 در گروه C واقع شده‌اند. نمونه P10 مربوط به گمانه اکتشافی است که به صورت چاه نیمه آرتزین در اعماق کاواک معدن ۲ ظاهر شده است و نمونه D5 نیز آب‌های برگشتی از گمانه‌های آرتزین واقع در پیت معدن گل‌گهر زمین می‌باشد. گروه D متعلق به نمونه D4 است که به طور مجزا در یک گروه جداگانه قرار گرفته است که مربوط به دریاچه خیرآباد است و دارای



شکل ۶- دو روش دندروگرام با نقشه حرارتی. گرادیان رنگی از زرد تا سورمه ای، نشان دهنده محدوده کم‌ترین شوری (زرد) تا بیشترین (سورمه ای) از هر تغییرات هیدروشیمی. گروه A (آبخوان آبرفتی)، گروه B (اختلاطی)، گروه C (سازندی) و گروه D (شورابه کفه نمکی خیرآباد).

Figure 6. Two-way dendrogram with the heat map. The color gradient from yellow to dark blue represents the range from the lowest similarity (yellow) to the highest (dark blue) of each hydrochemical variable. Group A (alluvial aquifer), group B (mixed), group C (Hard rock aquifer), group D (Kheirabad salt pan brine).

بیشتر است. SOM می‌تواند آشکارا، تغییرات در ویژگی‌های هیدروژئوشیمی را بر اساس فاصله بین دو گره نمونه تجسم کند. خوشه‌ها با آزمایش چندین روش خوشه‌بندی از جمله HCA با روش وارد (Ward)، K-means، به گروه‌های معناداری تقسیم می‌شوند که به عنوان مرز در نقشه گره SOM با موفقیت به چهار گروه (A تا D) تقسیم شدند که بر روی نقشه‌های گره SOM رسم شدند. نتایج مدل برای اسفند ۱۴۰۰ در شکل ۸ ارایه شده است.

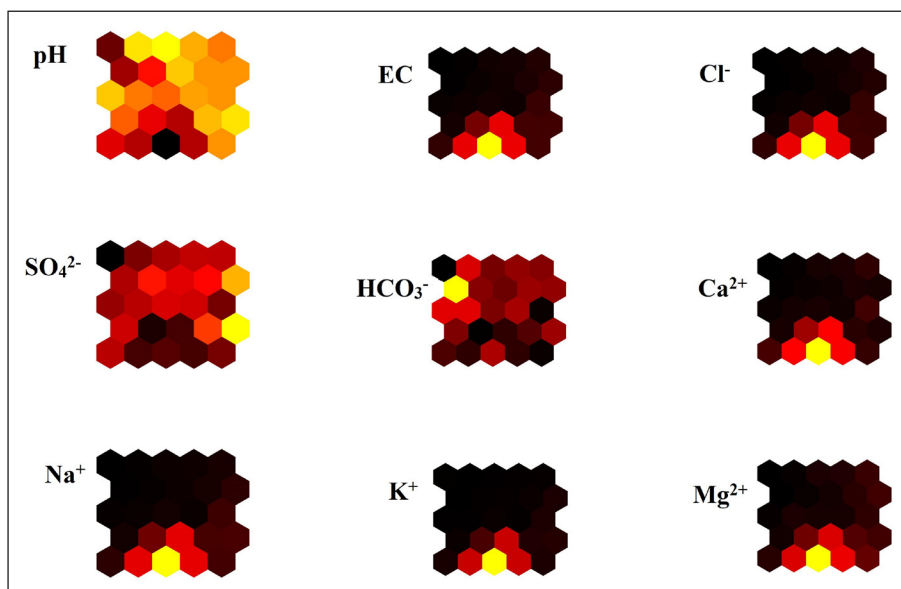
نتایج تفکیکی تحلیلی SOM معدن گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد به طور مقایسه‌ای در جدول ۳ نشان داده شده است. ارتباط قوی بین EC، K^+ ، Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} وجود دارد. به جز pH، SO_4^{2-} و HCO_3^- که به ترتیب نوروهای ۲۳، ۱۰ و ۱۶ را تحریک کرده‌اند، سایر ورودی‌ها بیشترین تحریک را بر نوروهای ۳ داشته‌اند. به عبارتی، نوروهای گروه A با کمترین هدایت الکتریکی در گستره

۳-۲-۲- نکاشت خودسازمان‌ده (SOM)

در مدل SOM لایه خروجی تعداد نوروها در شبکه عصبی با استفاده از روش ابتکاری پیشنهاد شده توسط ویسانتو و آل‌هونی‌می (Vesanto and Alhoniemi, 2000)، با ۲۵ نورو انتخاب شده و نکاشت‌های خود سازمان‌ده تهیه شدند. هر ماتریس SOM در شکل ۷ نشان دهنده یک متغیر است که با سایه زرد تا مشکی مشخص شده است. هر چه قدر رنگ گره تیره‌تر باشد، پارامتر تأثیر کمتری روی آن گره دارد و در واقع نمونه مربوط به آن گره، کمترین غلظت یا مقدار را در آن پارامتر دارد و برعکس (Wang et al., 2023). گرادیان رنگ متغیرها در ماتریس SOM روابط متغیرها را نشان می‌دهد. یون‌های Ca^{2+} ، K^+ ، Cl^- ، Mg^{2+} ، Na^+ و EC دارای گرادیان‌های رنگی مشابهی هستند که نشان می‌دهد این شش پارامتر دارای همبستگی مثبت هستند. در ماتریس خوشه‌بندی، هر چه فاصله توپولوژیکی نزدیک‌تر باشد، شباهت نوروها

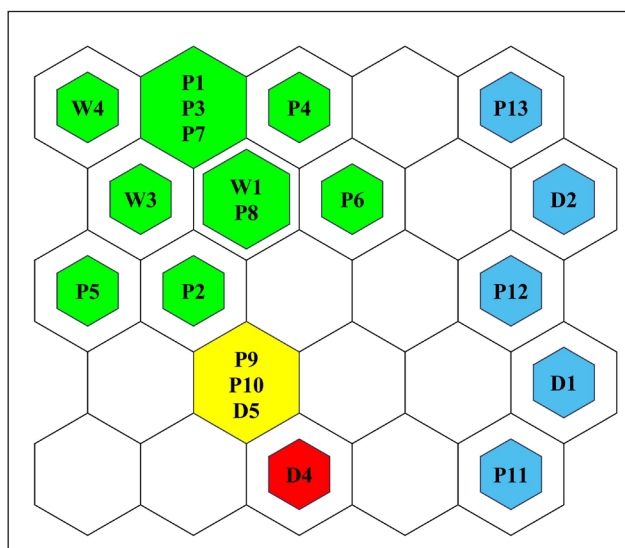
آب‌های ژرف محبوس باشد. بیشترین و کمترین تأثیر pH بر روی نمونه‌های P4 و D4 می‌باشد. در نگاشت فاصله نوروں‌های همسایه، نوروں‌های سبز و قرمز بیشترین فاصله را از هم دارند. در جدول ۳ بیشترین مقدار به جز سولفات و بی‌کربنات مربوط به گروه D می‌باشد و کمترین مقادیر به جز بی‌کربنات و سولفات مربوط به گروه A است. بیشترین تأثیرهای سولفات بر روی گروه B و نوروں ۱۰ و پس از آن بر روی گروه A دارد. بیشترین تأثیر بی‌کربنات بر گروه A و نوروں ۱۶ وجود دارد.

مورد مطالعه (نوروں‌های سبز رنگ شکل ۸)، کمترین تأثیر را بر روی EC, Na^+, K^+ ، گروه D (شورابه کفه نمکی خیرآباد) نسبت به گروه C که مربوط به نمونه‌های با منشأ آب سازندی است، بیشترین تأثیر را بر پارامترهای هیدروشیمیایی $EC, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-$ دارد. آنیون‌های بی‌کربنات و سولفات به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نمونه W3 واقع در گروه A و نمونه D1 واقع در گروه B داشته‌اند. گروه C با منشأ آب سازندی، کمترین تأثیر را بر روی آنیون سولفات دارد که می‌تواند در ارتباط با احیا سولفات در شورابه‌های کلروره



شکل ۷- صفحات اجزای نقشه خود سازمان‌دهی برای ۹ پارامتر اصلی هیدروشیمیایی معدن گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد.

Figure 7. The component planes of self organizing map for 9 major hydrochemical parameters of Sirjan Golgohar mine and Kheirabad salt pan.



شکل ۸- نگاشت خروجی نگاشت خود سازمان ده SOM (Sample Hits) داده‌های هیدروشیمی معدن گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد (سبز: منشأ آبخوان آبرفتی، آبی: منشأ اختلاطی، زرد: منشأ سازند سخت و ژرف، قرمز: منشأ شورابه کفه نمکی خیرآباد).

Figure 8. SOM Sample Hits of Hydrochemical data of Golgohar Sirjan mine and Kheirabad salt pan (green: alluvial aquifer source, blue: mixed source, yellow: Hard rock aquifer source, red: Kheirabad salt pan brine source).

جدول ۳- تحریک پذیری نورون‌ها نسبت به داده ورودی هیدروشیمی نمونه‌های آب معدن گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد برای هر گروه SOM (تقسیم بندی بر اساس ۴ گروه - گروه A: منشأ آبخوان آبرفتی، گروه B: منشأ اختلاطی، گروه C: منشأ آب سازندی و عمیق، گروه D: منشأ شورابه کفه نمکی خیرآباد)، (EC بر حسب: میلی موهس بر سانتی‌متر و سایر پارامترها بر حسب: میلی‌اکی‌والان بر لیتر) (رنگ‌ها به ترتیب از کمترین به بیشترین مقدار: سبز پررنگ، سبز کم‌رنگ، نارنجی، قرمز)

Table 3. The excitability of neurons compared to the hydrochemical input data of water samples from Golgohar Sirjan mine and Kheirabad salt pan for each SOM group (divided into 4 groups - group A alluvial aquifer source, group B: mixed source, group C: Hard rock aquifer source, group D: Kheirabad salt pan brine source. (EC in terms of: m mho/ cm and other parameters in terms of: meq/ L) (Colors in order from the lowest to the highest value: dark green, green pale, orange, red))

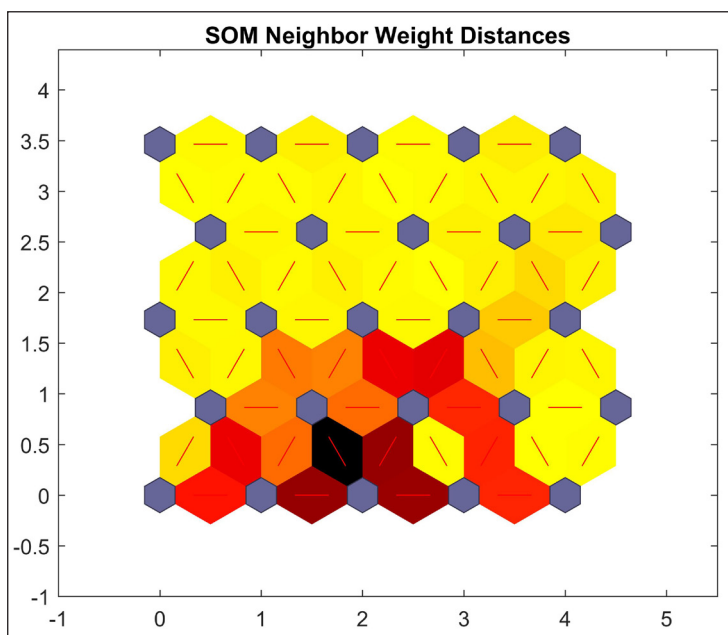
Parameter	Group A	Group B	Group C	Group D
EC	16.3	62.6	127.3	526
Cl ⁻	140.2	807.5	1968	8311.6
SO ₄ ²⁻	49.2	72.3	14.2	28.1
HCO ₃ ⁻	1.7	1.2	0.7	1.6
Ca ²⁺	67.9	214.0	738.3	2328.2
Na ⁺	105.1	553.9	1090.0	4862.2
K ⁺	0.3	1.4	3.7	24.8
Mg ²⁺	20.9	91.1	145.4	647.5

(D و نورون ۱۰ (گروه B) نیز فاصله متوسطی به یکدیگر دارند و این تشابه متوسط منشأ اختلاطی نمونه D1 (واقع در گروه B و نورون ۱۰) با گروه D را تایید می‌کند، به بیان دیگر، شورابه کفه نمکی خیرآباد با نمونه‌های آبخوان آبرفتی (با توجه به موقعیت قرارگیری نمونه D1 اختلاط پیدا کرده و گروه B را پدید آورده است. از طرفی نورون ۷ (گروه C) با گروه B فاصله متوسطی دارد که منشأ اختلاطی نمونه‌های بیت در گروه B از آب سازند سخت را تایید می‌کند.

با توجه به شکل ۹، نورون‌های گروه C بیشترین تشابه را به یکدیگر دارند و پس از آن نورون‌های گروه A کمترین فاصله (بیشترین مشابهت) به یکدیگر دارند. نورون ۷ (گروه C) و نورون ۳ (گروه D)، بیشترین فاصله و یا کمترین مشابهت به هم دارند (فاصله بین آن‌ها رنگ مشکی است) و دلیلی بر این می‌باشد که منشأ شوری آب سازندی (گروه C) از شورابه کفه نمکی خیرآباد (گروه D) نمی‌باشد، همچنین با یکدیگر متفاوت هستند و کمترین تشابه بین این دو گروه وجود دارد. نورون ۳ (گروه

شکل ۹- نگاشت فاصله وزن‌های نورون‌های همسایه (SOM Neighbor Weight Distance) داده‌های هیدروشیمی معدن گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد.

Figure 9. SOM Neighbor Weight Distance of Hydrochemical data of Golgohar Sirjan mine and Kheirabad salt pan.



۴- بحث

شامل نمونه‌های P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, W1, W3, W4 است که نمونه‌های سطوح نشست، واقع در پله‌های ابتدایی پیت معدن ۲ و گمانه‌های اطراف پیت ۲ را در برمی‌گیرد. منشأ سدیم در این گروه ناشی از انحلال هالیت و در برخی نمونه‌ها تبادل یونی می‌باشد. در این گروه، انحلال کانی‌های سولفات (انحلال ژبیس) منشأ اصلی کلسیم و منیزیم است. نوع و رخساره چیره در این گروه کلروره-سدیک است.

گروه B: این گروه مربوط به آب‌های با منشأ اختلاطی است (P11, P12, P13, D1, D2). نمونه‌های P11, P12 و P13 حاصل اختلاط آبخوان آبرفتی جوی با آب‌های سازند سخت می‌باشند (به دلیل قرار گیری موقعیت این نمونه‌ها در پله‌های پایینی پیت ۲). آب‌های شور سنگ‌های سخت از طریق درزه‌ها و گسل‌ها خود را به آبخوان آبرفتی رسانده و اختلاط رخ داده است و نمونه‌های D1, D2 ناشی از اختلاط آبخوان آبرفتی جوی با شورابه‌های کفه نمکی خیرآباد هستند. عامل شوری در این گروه متأثر از اختلاط آبخوان آبرفتی و شورابه نمکی خیرآباد و از طرفی آبخوان سازند سخت باشد. منشأ اصلی شوری انحلال هالیت است و تبادل کاتیونی معکوس می‌باشد. با توجه به قرار گیری نمونه‌های D1 و D2 (نمونه‌های نواحی اطراف پیت که منشأ آن اختلاط آبخوان آبرفتی جوی با شورابه کفه نمکی خیرآباد) با نمونتهای واقع در پیت در یک گروه، احتمالاً ارتباط شورابه کفه نمکی خیرآباد را تا حدودی با آبخوان آبرفتی پیت معدن ۲ را تایید می‌کند.

گروه C: این گروه مربوط به آب با منشأ سنگ‌های سخت و شورابه ژرفی است. نمونه‌های P9, P10, D5 در این گروه جای می‌گیرند. منشأ سدیم و کلر در این گروه از شورابه‌های ژرفی است که منشأ آب‌های ژرف و سازند سخت دارند. نمونه P10 از گمانه واقع در سازند سخت به صورت آرتزین با دبی ۱/۵ تا ۲ لیتر بر ثانیه جریان پیدا می‌کند و نمونه D5 مربوط به آب برگشتی از معدن شماره ۳ (آب‌های سازندی جمع شده از کف پیت معدن گهر زمین می‌باشد) که به یک نقطه هدایت و جمع شده است. بر اساس یافته‌ها عامل شوری در این گروه کفه نمکی خیرآباد نمی‌باشد و در صورت وجود ارتباط با کفه نمکی خیرآباد در اعماق با سایر آب‌ها اختلاط شدید پیدا نموده است.

گروه D: منشأ شورابه کفه نمکی خیرآباد است. تنها نمونه D4 در این گروه واقع شده است که از آب دریاچه کفه نمکی خیرآباد برداشت شده است. عامل شوری در این گروه انحلال هالیت، تبخیر شدید و تبادل کاتیونی معکوس می‌باشد.

در پیت معدن ۲ با افزایش ژرفا، شوری آب زیرزمینی بیشتر می‌شود (شکل ۲)، که نشان می‌دهد تحت تاثیر آب سازند سخت قرار گرفته‌اند (نمونه‌های اختلاطی، گروه B). به بیان دیگر، نقش ساختارهای زمین‌ساختی منطقه و لایه‌بندی در انتقال آب به پیت ۲ قابل توجه است و این گسل‌ها به همراه شکستگی‌ها با شکستن لایه‌بندی سبب نشست آب به پیت ۲ می‌شوند. آب سازند از طریق گسل‌ها و درزه‌ها و با توجه به زمین‌ساخت فعال منطقه بالا می‌آید و به صورت سطوح نشتی رخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که ترکیب شیمیایی آب کفه نمکی با آب سازند سخت هم‌خوانی ندارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که منشأ اصلی آب شور در آبخوان سنگ سخت، کفه نمکی خیرآباد نیست و در صورت وجود ارتباط، اختلاط بسیار شدیدی با سایر آب‌ها پیدا می‌کند. اما آبخوان آبرفتی می‌تواند با کفه نمکی خیرآباد ارتباط داشته باشد.

۵- نتیجه گیری

این مقاله بر شیمی یون‌های اصلی در معدن ۲ گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد برای تعیین منشأ شوری و فرایندهای هیدروشیمیایی با استفاده از نگاشت

این مطالعه با استفاده از داده‌های پیشین و همچنین انجام آنالیزهای هیدروژئوشیمیایی و تفسیر حاصل از تحلیل خوشه‌های سلسله مراتبی و نگاشت خودسازمان‌ده سعی در شناسایی منشأ شوری آب زیرزمینی در معدن ۲ گل‌گهر سیرجان و کفه نمکی خیرآباد دارد. شرایط آب زیرزمینی شور در بسیاری از مناطق خشک نتیجه تبخیر آب و یا انحلال رسوبات تبخیر شده است (Abirifard et al., 2017; Gharaat et al., 2020). با این حال تحقیقات سو و همکاران (Su et al., 2020) پیشنهاد کرد که پمپاژ آب زیرزمینی برای مصارف مختلف در مناطق خشک می‌تواند فعل و انفعالات آب و سنگ را تسریع کند و سبب تغذیه مجدد از آب شور شود و شوری آب زیرزمینی را افزایش دهد.

فرایند بالقوه شوری در آب‌های زیرزمینی معدن ۲ گل‌گهر سیرجان را می‌توان به انحلال هالیت، تبخیر آب، نفوذ آب شور از کفه نمکی خیرآباد و فعل و انفعالات آب و سنگ نسبت داد. هیدروژئولوژی، چینه‌شناسی، شواهد هیدروژئوشیمیایی به ما کمک می‌کنند تا منشأ آب‌های زیرزمینی را بهتر درک کنیم. با توجه به شکل ۴، انحلال هالیت به احتمال زیاد منشأ اصلی شوری در آبخوان آبرفتی و هم آبخوان سنگ سخت و هم کفه نمکی خیرآباد می‌باشد. افزون بر این، تبادل کاتیونی معکوس نیز در گروه اختلاطی و هم آبخوان سنگ سخت به دلیل زمان ماندگاری طولانی آب‌های زیرزمینی غنی از سدیم رخ داده است که شیمی آب را تغییر می‌دهد. تبادل کاتیونی در برخی نمونه‌های واقع در آبخوان آبرفتی (نمونه‌های چاه‌های مشاهده‌ای)، احتمالاً به دلیل زمان اقامت کوتاه‌تر و محتوای کم سدیم در آب زیرزمینی و شوری کمتر مشاهده نگردید. یک غنی‌شدگی از کلسیم و منیزیم در آب زیرزمینی در تمام گروه‌ها دیده می‌شود. اگر چه غلظت اضافی Ca^{2+} و Mg^{2+} در آب زیرزمینی آبخوان سازند سخت و یا گروه اختلاطی در پیت معدن ۲، نمی‌تواند به دلیل انحلال کربنات و یا انحلال کانی‌های سولفات باشد و احتمال خیلی زیاد تبادل کاتیونی معکوس در این گروه‌ها اتفاق افتاده است. نقشه‌های خودسازمان‌ده (SOM) و خوشه‌بندی سلسله مراتبی (HCA) با کمک نقشه حرارتی (Heat Map) نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌ها (نمودار پایپر و نسبت‌های یونی)، برای گروه‌بندی و تعیین منشأ آب گستره مورد مطالعه ارائه کرد. در حالی که رویکرد کلاسیک مبتنی بر بررسی بصری با استفاده از نمودار پایپر، نمونه‌ها را همگی در یک تیپ (Na-Cl) قرار داد، که این گروه‌بندی نمی‌تواند تفسیرهای عمیقی بر استنباط هیدروشیمی منطقه و تعیین منشأ داشته باشد. به عنوان مثال، آب‌های با منشأ آبخوان آبرفتی جوی و شورابه کفه نمکی خیرآباد با رویکرد کلاسیک مانند نمودار پایپر همگی تیپ Na-Cl دارند، اما نتایج حاصل از SOM و نقشه دندروگرام Heat Map این دو منشأ را در دو گروه مختلف دسته‌بندی می‌کند.

بر اساس یافته‌های مکنونی و همکاران (Maknoui et al., 2018) تقریباً تمام منابع آب در منطقه گل‌گهر، هم آبخوان آبرفتی و هم آبخوان سنگ سخت، کم و بیش تحت تاثیر پهنه نمکی قرار گرفته‌اند که در سمت شمال معدن (پهنه نمکی خیرآباد) بوده و اختلاط آن با آب یک آبخوان شیرین در خاور به نام حوضه چاه‌دراز است. بر اساس نمونه‌های ایزوتوپی، چهار گروه مختلف از منابع آب در معدن گل‌گهر سیرجان وجود دارد: آب شور در اطراف پهنه نمکی، آب‌های بارش، آب‌های نشتی به درون پیت، آب‌های زیرزمینی واقع در چاه‌های پمپاژ، مشاهده‌ای و پیرومتریک. به طور کلی با نتایج به دست آمده از دندروگرام خوشه‌ای HCA و SOM، با موفقیت منشأ آب معدن گل‌گهر سیرجان (معدن ۲) و کفه نمکی خیرآباد تعیین و آن‌ها را به ۴ گروه مختلف طبقه‌بندی کرد که کل فرایندهای هیدروشیمیایی سیستم آبخوان معدن را توضیح می‌دهد. با توجه به مطالب ارائه شده پیشین، ۴ گروه منشأ آب‌های گستره مورد مطالعه عبارتند از:

گروه A: این گروه مربوط به آب‌های آبخوان آبرفتی و نمونه‌هایی با کمینه غلظت می‌باشند و هدایت الکتریکی کمتر از ۲۵ میلی‌موس بر سانتی‌متر دارند. این گروه

است. نتایج نشان می‌دهند که ترکیب شیمیایی آب کفه نمکی با آب سازند سخت همخوانی ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که منشأ اصلی آب شور در آبخوان سنگ سخت، کفه نمکی خیرآباد نیست و در صورت وجود ارتباط، اختلاط بسیار شدیدی با سایر آب‌ها پیدا می‌کند. اما آبخوان آبرفتی پیت معدن ۲ با کفه نمکی خیرآباد ارتباط وجود دارد.

به طور کلی SOM با موفقیت منشأ آب معدن گل‌گهر سیرجان (معدن ۲) و کفه نمکی خیرآباد را به ۴ گروه مختلف طبقه‌بندی کرد که کل فرایندهای هیدروشیمیایی سیستم آبخوان معدن را توضیح می‌دهد. نتایج این مطالعه، برتری استفاده از SOM برای درک صریح فرایندهای هیدروشیمی در مناطق معدنی و شورابه‌ها را نشان می‌دهد. افزایش پارامترها ممکن است برای به دست آوردن بینش بیشتر در کارهای آینده توصیه شود.

سپاسگزاری

این پژوهش از حمایت مالی پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر پویش گام (شماره قرارداد: ۹۹/۸۵۸/ص.گ) بهره‌مند شده است.

خودسازمان‌ده و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی با کمک نقشه حرارتی (Heat Map) متمرکز شده است. SOM همراه با خوشه بندی HCA نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌ها (نمودار پایپر و نسبت‌های یونی)، برای گروه‌بندی و تعیین منشأ آب گستره مورد مطالعه با استفاده از داده‌های غلظت ۹ پارامتر هیدروشیمیایی ارائه کرد. در حالی که رویکرد کلاسیک مبتنی بر بررسی بصری با استفاده از نمودار پایپر، نمونه‌ها را همگی در یک نوع (Na-Cl) قرار داد، که این گروه‌بندی نمی‌تواند تفسیرهای عمیقی بر استنباط هیدروشیمی منطقه و تعیین منشأ داشته باشد. به عنوان مثال، آب‌های با منشأ آبخوان آبرفتی جوی و شورابه کفه نمکی خیرآباد با رویکرد کلاسیک مانند نمودار پایپر همگی تیپ Na-Cl دارند، اما نتایج حاصل از SOM و نقشه دندروگرام Heat Map این دو منشأ را در دو گروه مختلف دسته‌بندی می‌کند. انحلال‌هالیت به احتمال زیاد منشأ اصلی شوری در آبخوان آبرفتی و هم آبخوان سنگ سخت و هم کفه نمکی خیرآباد می‌باشد. افزون بر این، تبادل کاتیونی معکوس نیز در گروه اختلاطی و هم آبخوان سنگ سخت به دلیل زمان ماندگاری طولانی آب‌های زیرزمینی غنی از سدیم رخ داده است که شیمی آب را تغییر می‌دهد و به مقدار جزئی در چند نمونه با منشأ آبخوان آبرفتی، تبادل کاتیونی مستقیم و انحلال ژپس محتمل

References

- Abirifard, M., Raeisi, E., Zarei, M., Zare, M., Filippi, M., Bruthans, J., and Talbot, C.J., 2017. Jahani Salt Diapir, Iran: hydrogeology, karst features and effect on surroundings environment. *Int J Speleol*, 46(3), 445-457. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.46.3.2133>.
- APHA/AWWA/WEF., 2017. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition. America Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, DC.
- Appelo, C.A.J., and Postma, D., 2005. Groundwater and Pollution, second ed. A.A. Balkema Publishers, Leiden.
- Assari, A., 2019. Defining hydrogeology of the Gohar-Zamin open pit mine, Iran: a case study in a hard-rock aquifer. *Hydrogeol J*, 27(4), 1479-1495. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-01919-4>.
- Chidambaram, S., Karmegam, U., Prasanna, MV., Sasidhar, P., and Vasanthavigar, M., 2011. A study on hydrochemical elucidation of coastal groundwater in and around Kalpakkam region, southern india. *Environmental Earth Sciences*, 64 (5), 1419-1431. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0966-3>.
- Farsadnia, F., Kamrood, M.R., Nia, A.M., Modarres, R., Bray, M.T., Han, D., and Sadatinejad, J., 2014. identification of homogeneous regions for regionalization of watersheds by two-level self-organizing feature maps. *J. Hydrol*, 509, 387-397. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.050>.
- Gharaat, M. J., Mohammadi, Z., Assari, A., and Rezanezhad, F., 2022. Groundwater Circulation and Origin of Salinity in a Multi-aquifer System: The Gohar-Zamin Mining Area, Iran. *Mine Water and the Environment*. Springer Science and Business Media LLC, 41(4), 996-1014. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-018-01919-4>.
- Gharaat, M.J., Mohammadi, Z., and Rezanezhad, F., 2020. Distribution and origin of potentially toxic elements in a multi-aquifer system. *Environ Sci Pollut Res*, 27, 43724-43742. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10223-2>.
- Heidari-Nejad, H., Zarei, M., and Merkel, B.J., 2017. Evaluating the origin of seepage water in the Golgohar Iron mine, Iran. *Mine Water Environ*, 36(4), 583-596. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0447-3>.
- Jahanshahi, R., and Zare, M., 2017. Delineating the origin of groundwater in the Golgohar mine area of Iran using stable isotopes of 2H and 18O and hydrochemistry. *Mine Water Environ*, 36(4), 550-563. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0444-6>.
- Kohonen, T., 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biol. Cybern*, 43(1), 59-69. <https://doi.org/10.1007/BF00337288>.
- Koudenoukpo, Z.C., Odountan, O.H., Agboho, P.A., Dalu, T., Van Bocxlaer, B., de Bistoven, L.J., Chikou, A., and Backeljau, T., 2021. Using self-organizing maps and machine learning models to assess mollusc community structure in relation to physicochemical variables in a West Africa River-estuary system. *Ecol. Indic*, 126 (107706). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107706>.
- Lall, U., Josset, L., and Russo, T., 2020. A snapshot of the world's groundwater challenges. *Annu. Rev. Environ. Resour*, 5, 171-194. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025800>.
- Li, J., Shi, Z.M., Wang, G.C., and Liu, F., 2020. Evaluating spatiotemporal variations of groundwater quality in Northeast Beijing by Self-organizing Map. *Water*, 12(5) (1382). <https://doi.org/10.3390/w12051382>.

- Liu, P., Hoth, N., Drebenstedt, C., Sun, Y.J., and Xu, Z.M., 2017. Hydro-geochemical paths of multi-layer groundwater system in coal mining regions - using multivariate statistics and geochemical modeling approaches. *Sci. Total Environ*, 601–602, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.146>.
- Maknooni Gilani, S., 2018. Exploitation potential of Golgohar hard rock aquifer by isotope, geophysics and hydrogeological methods. Ph.D. Dissertation, Shiraz University, 125 P.
- Maknoui, S., Zare, M., and Raeisi, E., 2018. Determining the hard rock groundwater pathway in Golgohar complex formation using hydrochemical data in AHP, *Arabian Journal of Geosciences*, 11 (172). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3472-z>.
- Nakagawa, K., Yu, Z.-Q., Berndtsson, R., and Hosono, T., 2020. Temporal characteristics of groundwater chemistry affected by the 2016 Kumamoto earthquake using self organizing maps. *J. Hydrol*, 582 (124519). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124519>.
- Nguyen, T.T., Kawamura, A., Tong, T.N., Nakagawa, N., Amaguchi, H., and Gilbuena, R.J., 2015. Clustering spatio-seasonal hydrogeochemical data using Self-Organizing Maps for groundwater quality assessment in the Red River Delta, Vietnam. *J. Hydrol*, 522, 661–673. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.023>.
- Orak, E., Akkoyunlu, A., and Can, Z.S., 2020. Assessment of water quality classes using self organizing map and fuzzy C-means clustering methods in Ergene River, Turkey. *Environ Monit Assess*, 192 (638). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08560-3>.
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Trans. Am. Geophys. Union*, 25, 914–923. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>.
- Qiao, X.J., Li, G.M., Li, M., Zhou, J.L., Du, J., Du, C.Y., and Sun, Z.H., 2011. Influence of coal mining on regional karst groundwater system: a case study in west mountain area of Taiyuan city, northern China. *Environ. Earth Sci*, 64(6), 1525–1535. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0586-3>.
- Rahman, A.T.M., Kono, Y., and Hosono, T., 2022. Self-organizing map improves understanding on the hydrochemical processes in aquifer systems. *Science of the Total Environment*, 846 (157281). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157281>.
- Richter, B.C., Kreidler, C.W., and Bledsoe, B.E., 1991. Identification of sources of ground-water salinization using geochemical techniques. US environmental protection agency, office of Research and Development. Robert S Kerr Environmental Research Laboratory, 258 P.
- Sabzehei, M., Eshraghi, S.A., Roshan, Ravan, J., and Seraj, M., 1997. Geological Report of Gol-Gohar map. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Steinmetz, R.L.L., Salvi, S., García, M.G., Arnold, Y.P., B'eziat, D., Franco, G., Constantini, O., Francisco, E., C'ordoba, F.E., and Caffè, P.J., 2018. Northern Puna plateau-scale survey of Li brine-type deposits in the Andes of NW Argentina. *Journal of Geochemical Exploration*, 190, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.013>.
- Stiff, H.A., 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *J. Pet. Technol*, 3, 15–17.
- Su, Z., Wu J, He, X., and Elumalai, V., 2020. Temporal changes of groundwater quality within the groundwater depression cone and prediction of confined groundwater salinity using Grey Markov Model in Yinchuan area of northwest China. *Expos Health*, 12(3), 447–468. <https://doi.org/10.1007/s12403-020-00355-8>.
- Tran, T.Q., Banning, A., Heinze, T., and Wohnlich, S., 2022. Integration of self-organizing maps, statis-tical analysis, and hydrogeochemical modeling methods to identify spatio-seasonal variations in mine water quality. *J. Geochem. Explor*, 233 (106908). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106908>.
- Tsuchihara, T., Shirahata, K., Ishida, S., and Yoshimoto, S., 2020. Application of a Self-Organizing Map of Isotopic and Chemical Data for the Identification of Groundwater Recharge Sources in Nasunogahara Alluvial Fan, Japan. *Water*, 12 (278). <https://doi.org/10.3390/w12010278>.
- USEPA, 2007, Groundwater Sampling SESDPROC-301-R1, SESD Operating Procedure for Groundwater Sampling. United State Environmental Protection Agency.
- Vesanto, J., and Alhoniemi, E., 2000. Clustering of the self-organizing map. *IEEE Trans. Neural Netw*, 11(3), 586–600. <https://doi.org/10.1109/72.846731>.
- Wang, C., Liao, F., Wang, G., Qu, S., Mao, H., and Bia, Y., 2023. Hydrogeochemical evolution induced by long-term mining activities in a multi-aquifer system in the mining area. *Science of the Total Environment*, 854 (158806). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158806>.
- Wang, R, Bian J.M, Gao Y., 2014. Research on hydrochemical spatio-temporal characteristics of groundwater quality of different aquifer systems in Songhua River basin, eastern songnen plain, northeast china. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(12), 5081-5092. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1324-z>.
- Wu, J.H., Li, P.Y., Qian, H., Duan, Z., and Zhang, X.D., 2014. Using correlation and multivariate statistical analysis to identify hydrogeochemical processes affecting the major ion chemistry of waters: a case study in Laoheba phosphorite mine in Sichuan, China. *Arab. J. Geosci*, 7(10), 3973–3982. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1057-4>.
- Zaryab, A., Nassery, H.R., and Alijani, F., 2021. Identifying sources of groundwater salinity and major hydrogeochemical processes in the Lower Kabul Basin aquifer, *Afghanistan Environmental Science Processes and Impacts*, 23 (1589). <https://doi.org/10.1039/D1EM00262G>.