

Original Research Paper

Comparison of groundwater hydrogeochemistry in the Sarcheshmeh copper, Gol-e-Gohar iron ore, and Pabdana coal mining areas in Kerman province

Ali Saeedi Rashk Olia¹, Hamid Reza Nassery^{1*}, and Farshad Alijani¹

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2026 February 13

Accepted: 2026 August 11

Available online: 2026 September 23

Keywords:

Hydrochemical facies

Water-rock interaction

Salinity

Cation exchange

Hierarchical cluster analysis

ABSTRACT

This study characterized the hydrogeochemical properties of water resources and evaluated their application to exploration geochemistry in the Sarcheshmeh copper, Gol-e-Gohar iron-ore, and Pabdana coal mining areas of Kerman Province, Iran. In May 2024, 28 water samples—nine from Gol-e-Gohar, nine from Sarcheshmeh, and ten from Pabdana—were collected from 18 springs, seven wells, one open-pit water body, one source associated with an underground mine, and one mine-drainage outlet. Physicochemical parameters and major ions were measured, and the data were interpreted using Piper and Gibbs diagrams, ionic relationships, chloro-alkaline indices, and hierarchical cluster analysis. Electrical conductivity ranged from 9,140 to 102,700, 277 to 2,960, and 635 to 9,740 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in Gol-e-Gohar, Sarcheshmeh, and Pabdana, respectively. Gol-e-Gohar samples displayed a Na-Cl facies and indicated the possible influence of a saline component associated with the Kheirabad salt pan. $\text{Ca}-\text{HCO}_3$ was dominant at Sarcheshmeh, whereas the SW5 mine-drainage sample was distinguished by a $\text{Ca}-\text{SO}_4$ facies. Pabdana showed more diverse facies, and PW4 had the highest salinity, consistent with evaporation and water-rock interaction. Cluster analysis identified four, four, and five groups in the three areas, respectively. Water chemistry reflected water source, lithology, hydrogeological setting, water-rock interaction, mine drainage, and evaporation.

1. Introduction

The chemical composition of water resources in mining areas reflects the combined effects of natural and human-related factors. Lithology and mineralogy, geological structures, flow paths, residence time, mixing, evaporation, and water-rock interaction can all modify the concentrations of dissolved constituents. Mining and mine drainage may further alter flow conditions and increase contact between water, exposed rocks, waste materials,

and mineralized zones. However, the type and magnitude of these effects vary among sites and cannot be attributed directly to mining without adequate hydrogeological and geochemical evidence. Hydrochemical facies, ionic relationships, and salinity therefore provide an essential baseline for interpreting water chemistry in both environmental studies and mineral exploration.

Graphical and multivariate methods are commonly used to separate

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

Citation:

Saeedi Rashk Olia, A., Nassery, H. R., and Alijani, F., 2026. Comparison of groundwater hydrogeochemistry in the Sarcheshmeh copper, Gol-e-Gohar iron ore, and Pabdana coal mining areas in Kerman province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 36(3), 141, 137-154. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.572346.2245>.

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

 doi: 10.22071/gsj.2026.572346.2245

 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.7.9



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

these controls. Piper diagrams classify hydrochemical facies, Gibbs diagrams provide a broad indication of precipitation, water–rock interaction, and evaporation–crystallization tendencies, and bivariate ionic plots help evaluate possible dissolution, mixing, and ion-exchange patterns. Hierarchical cluster analysis (HCA) groups samples with similar chemical compositions and reveals within-area heterogeneity, but statistical similarity alone does not prove a common origin or hydraulic connection. Accordingly, such results must be interpreted together with geology, hydrogeology, source type, and sampling location.

Previous investigations have generally focused on individual mines or aquifers. In the present study, the Gol-e-Gohar iron-ore, Sarcheshmeh porphyry-copper, and Pabdana coal mining areas were treated as three independent case studies with contrasting geological and hydrogeological settings; no hydraulic connection among them was assumed. The purpose of the comparison was neither to rank water quality nor to attribute differences solely to deposit type. Instead, a common analytical framework was applied to distinguish locally controlled hydrochemical features from patterns that can be compared among the three areas. The study aimed to define the range of hydrochemical variation and facies in each area, identify chemically similar and anomalous samples, and assess how this information can support exploration geochemistry while reducing the risk of interpreting salinity, evaporation, mixing, or water–rock interaction as direct evidence of mineralization or mining impacts.

2. Research methodology

The three study areas are located in Kerman Province, southeastern Iran. Gol-e-Gohar lies southwest of Sirjan, Sarcheshmeh southwest of Rafsanjan, and Pabdana north of Zarand. Sampling was conducted during one campaign in May 2024. The 28 samples comprised nine samples from Gol-e-Gohar (GW), nine from Sarcheshmeh (SW), and ten from Pabdana (PW), collected from 18 springs, seven wells, one body of water accumulated in an open pit, one source associated with an underground mine, and one mine-drainage outlet. The sampling network was selected to represent the main water-source types and the geological and mining conditions of each area.

Water temperature, pH, and electrical conductivity (EC) were measured in the field using a portable HACH HQ40D multiparameter meter. Samples were filtered through 0.45- μ m membrane filters and stored in clean polyethylene bottles. Aliquots for cation analysis were acidified with nitric acid to pH < 2, whereas samples for anion analysis were kept unacidified. Sodium, potassium, calcium, and magnesium were determined according to ISO 14911:1998, and chloride and sulfate according to ISO 10304-1:2007, using ion chromatography. Bicarbonate was measured by

acid–base titration. Analytical consistency was evaluated using charge-balance error; absolute values ranged from 0.17% to 4.68% and were below 5% for all samples.

Before interpretation, major-ion concentrations were converted from mg/L to meq/L where required. Piper diagrams were used to classify hydrochemical facies, and Gibbs diagrams to evaluate broad tendencies associated with precipitation, water–rock interaction, and evaporation–crystallization. The Na–Cl relationship and the chloro-alkaline indices CAI-I and CAI-II were examined to assess relative ionic excesses and the probable direction of cation exchange. Major-ion concentrations were also plotted against total dissolved solids (TDS) after base-10 logarithmic transformation, and linear regressions were used as complementary statistical evidence rather than as stand-alone proof of ion sources. HCA was performed separately for each area using Na, K, Ca, Mg, HCO₃, Cl, and SO₄. Data were normalized by the Min–Max method, Euclidean distance was used as the dissimilarity measure, and Ward's linkage was applied. Cluster numbers were selected from dendrogram structure and major linkage-distance changes.

3. Results and discussions

The three areas displayed markedly different physicochemical ranges. Gol-e-Gohar had the highest salinity, with EC values of 9,140–102,700 μ S/cm, TDS of 6,133–51,600 mg/L, and pH of 6.50–8.55. The four pit-wall springs (GW1–GW4) were substantially more saline than the surrounding wells. Sarcheshmeh had lower mineralization, with EC of 277–2,960 μ S/cm, TDS of 152.3–1,480 mg/L, and pH of 6.10–7.90. SW5, collected from mine drainage, had the highest EC and TDS and the lowest pH in that area. Pabdana showed EC of 635–9,740 μ S/cm, TDS of 318–5,649.2 mg/L, and pH of 7.29–8.10. PW4, water accumulated in the Khomrud open pit, was clearly separated from the other Pabdana samples by its high salinity.

Piper classification further emphasized these contrasts. All Gol-e-Gohar samples had a Na–Cl facies, with negligible bicarbonate and generally minor sulfate contributions. Most Sarcheshmeh samples had a Ca–HCO₃ facies; SW5 was distinguished by a Ca–SO₄ facies, and SW8 showed a mixed ionic composition. Pabdana was more heterogeneous and was dominated by Ca–Mg–HCO₃ and Na–HCO₃ facies. PW1 had a Na–Cl facies, PW3 tended toward Na–Cl composition, and PW4 was transitional between chloride- and sulfate-rich water with a mixed cation composition. These facies differences indicate that water chemistry cannot be explained solely by the type of mineral deposit.

At Gol-e-Gohar, samples tended toward the evaporation–crystallization field on the Gibbs diagrams, although this position may also reflect mixing with saline water or brine. TDS was most strongly associated with Cl and Na ($R^2 = 0.957$ and

0.942, respectively), consistent with increasing salinity being accompanied mainly by these ions. All samples plotted below the 1:1 Na–Cl line and had positive CAI values, indicating an excess of chloride relative to Na + K and a possible cation-exchange effect in the alluvial deposits. HCA separated the samples into four groups: GW7–GW9 with the lowest relative salinity; GW5–GW6, distinguished by higher Ca and SO₄; GW2 as an intermediate single-sample group; and GW1, GW3, and GW4 as the most saline pit-wall waters. Taken together, these patterns are consistent with possible influence from a saline component associated with the Kheirabad salt pan, evaporation-related concentration, and water–rock interaction, although the contribution of each process cannot be quantified from the available data.

Most Sarcheshmeh samples plotted in the water–rock interaction field. SW5 contained 1,220 mg/L SO₄ and had a Ca–SO₄ facies, reflecting the influence of mine drainage and being compatible with sulfide oxidation, dissolution of sulfate phases, and subsequent neutralization reactions. Its pH of 6.10, however, indicates circumneutral rather than strongly acidic drainage. SW8 and SW10 had higher EC, TDS, Na, and Cl than the least mineralized springs and are located near phyllic and argillic alteration zones; this spatial association suggests stronger interaction with altered rocks but does not by itself prove clay-mineral dissolution. CAI values were negative for seven samples and positive for SW4 and SW10, indicating that the probable direction of cation exchange was not uniform. HCA produced four groups: SW5 alone; the low-salinity SW6–SW7 group; an intermediate group comprising SW1, SW3, SW4, and SW9; and SW8–SW10, which had relatively higher Na, Cl, and TDS.

In Pabdana, most samples also occupied the water–rock interaction field, whereas PW1, PW3, and especially PW4 shifted toward higher TDS and the evaporation–crystallization side of the Gibbs diagrams. PW4 contained high Na, Cl, and SO₄, and its location in an open pit is compatible with concentration by evaporation and prolonged contact with pit walls and sediments. PW1 and PW4 had positive CAI values, while the other eight samples had negative values, suggesting spatially variable cation-exchange behavior and possible contributions from reactions with clay-bearing and coal-bearing units. HCA defined five groups: PW4 alone; PW5, PW6, and PW10, characterized mainly by bicarbonate

waters; PW2 as a separate low-TDS sample with relatively higher K; PW7–PW9 with generally low TDS; and PW1–PW3 with comparatively higher Na, Cl, and TDS and a tendency toward Na–Cl composition. The clustering identifies chemical similarity and anomalous samples but does not establish water origin or hydraulic connectivity.

4. Conclusion

The results demonstrate that the three mining areas have distinct hydrochemical baselines. Gol-e-Gohar is characterized by high salinity and a consistent Na–Cl facies, with the pit-wall waters being more saline than nearby wells. The combined evidence is compatible with influence from saline water related to the Kheirabad salt pan, evaporation, and water–rock interaction, but the relative contribution of these processes remains unresolved. Sarcheshmeh is dominated by lower-salinity Ca–HCO₃ waters, whereas SW5 represents a distinct Ca–SO₄ mine-drainage sample. Pabdana is dominated by bicarbonate facies but contains the highly saline PW4 sample, whose composition is compatible with evaporation and interaction with materials exposed in the Khomrud open pit.

HCA classified the Gol-e-Gohar, Sarcheshmeh, and Pabdana samples into four, four, and five groups, respectively, and highlighted distinct samples such as GW2, SW5, PW2, and PW4. This classification is useful for describing within-area heterogeneity, selecting representative samples, and identifying locations that require closer monitoring. Nevertheless, clusters should not be interpreted as direct evidence of a common water origin, hydraulic connection, or a quantified mixing contribution.

Overall, water chemistry in the studied mining areas is controlled not only by deposit type or mining activity but also by water source, lithology, hydrogeological position, flow path, water–rock interaction, cation exchange, mine drainage, and evaporation. Establishing the hydrochemical background of each area before interpreting aqueous anomalies can therefore reduce misinterpretation in exploration geochemistry. Because sampling was conducted only once, seasonal monitoring is needed to test the stability of the observed facies and clusters. Environmental isotopes, saturation indices, and groundwater-level and flow-direction data are also recommended to constrain salinity sources and process contributions.

مقایسه هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی گستره‌های معدنی مس سرچشمه، آهن گل‌گهر و زغال سنگ پابدانا در استان کرمان

علی سعیدی رشک علی^۱، حمیدرضا ناصری^{۱*} و فرشاد علیجانی^۱

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

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

رخساره هیدروشیمیایی

برهم کنش آب-سنگ

شوری

تبادل کاتیونی

تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی

چکیده

ترکیب شیمیایی منابع آب در گستره‌های معدنی نتیجه اثر هم‌زمان عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی است. فعالیت‌های معدن‌کاری، به‌ویژه استخراج و زهکشی معدن، می‌توانند با تغییر مسیر جریان و افزایش تماس آب با سنگ‌ها، باطله‌ها و مواد معدنی، ویژگی‌های شیمیایی آب را تغییر دهند. باین‌حال، نوع و شدت این تغییرات در همه معادن یکسان نیست و به شرایط زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و اقلیم هر گستره بستگی دارد. این پژوهش با هدف شناخت ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب و ارزیابی کاربرد آن‌ها در مطالعات ژئوشیمی اکتشافی در ۳ گستره معدنی مس سرچشمه، سنگ‌آهن گل‌گهر و زغال‌سنگ پابدانا انجام شد. در اردیبهشت ۱۴۰۳، تعداد ۲۸ نمونه آب از گستره‌های معدنی مس سرچشمه، آهن گل‌گهر و زغال سنگ پابدانا برداشت شد. هدایت الکتریکی، pH و دما در محل و غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی در آزمایشگاه مورد سنجش قرار گرفت. داده‌ها با نمودارهای پایپر و گیبس، روابط یونی، شاخص‌های کلر و آلکال و تحلیل خوشه‌ای مورد بررسی و تفسیر قرار گرفتند. دامنه هدایت الکتریکی در منابع آب گستره‌های گل‌گهر، سرچشمه و پابدانا به ترتیب ۹۱۴۰ تا ۱۰۲۷۰۰، ۲۷۷ تا ۲۹۶۰ و ۶۳۵ تا ۹۷۴۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. نمونه‌های گل‌گهر نشانگر رخساره سدیم-کلر و اثرپذیری احتمالی از مولفه شور مرتبط با کفه نمکی خیرآباد می‌باشند. در سرچشمه، رخساره کلسیم-بی‌کربنات چیره است و زه‌آب معدنی SW5 با رخساره کلسیم-سولفات متمایز می‌باشد. پابدانا دارای رخساره‌های متنوع‌تری است و PW4 بیشترین شوری را دارد که با تبخیر و تماس آب-سنگ سازگار می‌باشد. براساس تحلیل خوشه‌ای نمونه‌های سه گستره به ترتیب در چهار، چهار و پنج خوشه قرار می‌گیرند. نتایج نشان داد شیمی آب گستره‌های معدنی مورد مطالعه تابع منشأ آب، سنگ‌شناسی، واکنش آب-سنگ، زهکشی معدن و تبخیر است.

۱- پیش‌نوشتار

ترکیب شیمیایی منابع آب در گستره‌های معدنی نتیجه اثر هم‌زمان عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی است. نوع سنگ و کانی‌های تشکیل‌دهنده آن، ساختارهای زمین‌شناسی، مسیر جریان، مدت حضور آب در آب‌خوان، اختلاط، تبخیر و واکنش میان آب و سنگ از مهم‌ترین عوامل موثر بر غلظت یون‌های محلول هستند. فعالیت‌های معدن‌کاری، به‌ویژه استخراج و زهکشی معدن، نیز می‌توانند با تغییر مسیر جریان و افزایش تماس آب با سنگ‌ها، باطله‌ها و مواد معدنی، ویژگی‌های شیمیایی آب را تغییر دهند. باین‌حال، نوع و شدت این تغییرات در همه معادن یکسان نیست و به شرایط زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و اقلیم هر گستره بستگی دارد؛ بنابراین، تفاوت‌های شیمیایی مشاهده‌شده را نمی‌توان بدون شواهد کافی، به فعالیت‌های معدن‌کاری نسبت داد (Appelo and Postma, 2005; Liu et al., 2017; Qin et al., 2019).

برای شناخت عوامل موثر بر ترکیب شیمیایی منابع آب، از روش‌های نموداری و آماری مختلف استفاده می‌شود. نمودار پایپر برای تعیین رخساره‌های هیدروشیمیایی، نمودار گیبس برای ارزیابی نقش بارش، واکنش آب-سنگ و تبخیر و نمودارهای دومتغیره برای بررسی روابط میان یون‌های عمده و شناسایی روندهای احتمالی انحلال، اختلاط و تبادل یونی به کار می‌روند (Piper, 1944; Gibbs, 1970; Hem, 1985; Appelo and Postma, 2005). تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی با قرار دادن نمونه‌های دارای ویژگی‌های شیمیایی مشابه در یک گروه، تفاوت‌های موجود در مجموعه داده‌ها را آشکار می‌کند و امکان مقایسه منظم‌تر نمونه‌ها را فراهم می‌سازد (Güler et al., 2002; Kim et al., 2005; Ayenew et al., 2009; Belkhir et al., 2011). باین‌حال، قرار گرفتن چند نمونه در یک خوشه فقط نشان‌دهنده شباهت آماری آن‌ها است و به‌تنهایی منشأ مشترک، ارتباط هیدرولیکی یا اثر یک فرایند مشخص را

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

ماخذنگاری:

سعیدی رشک علی، ع.، ناصری، ح. ر.، علیجانی، ف.، ۱۴۰۵، مقایسه هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی گستره‌های معدنی مس سرچشمه، آهن گل‌گهر و زغال سنگ پابدانا در استان کرمان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۳)، ۱۴۱-۱۵۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.572346.2245>

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است. doi: 10.22071/gsj.2026.572346.2245



doi: 10.22071/gsj.2026.572346.2245



doi: 10.22071/gsj.2026.572346.2245

doi: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.7.9



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

الگوهای قابل مقایسه میان سه گستره است.

هدف اصلی این پژوهش، شناخت ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب در هر گستره و بررسی کاربرد این اطلاعات در پی‌جویی و مطالعات ژئوشیمی اکتشافی است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا دامنه تغییرات و رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب در هر گستره تعیین می‌شود؛ سپس نمونه‌های دارای ترکیب شیمیایی مشابه و نمونه‌های متمایز شناسایی می‌شوند و در ادامه، شباهت‌ها و ویژگی‌های اختصاصی سه گستره از یکدیگر تفکیک می‌شوند. این روش ضمن شناسایی نمونه‌هایی که به بررسی بیشتری نیاز دارند، می‌تواند از تفسیر ناهنجاری‌های ناشی از شوری، تبخیر، اختلاط یا واکنش آب-سنگ به عنوان نشانه مستقیم فعالیت‌های معدن کاری یا وجود ذخایر معدنی جلوگیری کند.

۲- روش پژوهش

۲-۱- موقعیت و اقلیم گستره‌های مورد مطالعه

سه گستره معدنی مورد بررسی شامل معادن سنگ آهن گل‌گهر، مس سرچشمه و زغال‌سنگ پابدانا هستند که در استان کرمان، در جنوب‌خاور ایران، قرار دارند. گستره معدنی گل‌گهر در حدود ۵۵ کیلومتری جنوب‌باختر شهر سیرجان (Alibabaie et al., 2020)، گستره معدنی سرچشمه در حدود ۵۰ کیلومتری جنوب‌باختر شهر رفسنجان (Doulati Ardejani et al., 2008) و گستره معدنی پابدانا در حدود ۶۵ کیلومتری شمال شهر زرنند واقع شده‌اند (Mehrabi et al., 2023). موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به این گستره‌های معدنی در شکل ۱ نشان داده شده است. شرایط اقلیمی این سه گستره معدنی به دلیل تفاوت در ارتفاع و وضعیت ناهمواری‌ها یکسان نیست. گستره معدنی گل‌گهر دارای اقلیم خشک با میانگین بارش سالانه حدود ۱۲۴ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. گستره معدنی سرچشمه در ناحیه‌ای کوهستانی با اقلیم خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد؛ بارش سالانه آن حدود ۳۰۰ تا ۵۵۰ میلی‌متر است و دمای هوا در فصل‌های مختلف از حدود منفی ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند (Doulati Ardejani et al., 2008). گستره معدنی پابدانا نیز دارای اقلیم خشک و سرد است و بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی زرنند، میانگین بارش و دمای سالانه این ناحیه به ترتیب حدود ۱۹۸ میلی‌متر و ۱۷/۲ درجه سانتی‌گراد است (Aghaloo and Sharifi, 2023).

۲-۲- زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی گستره‌های مورد مطالعه

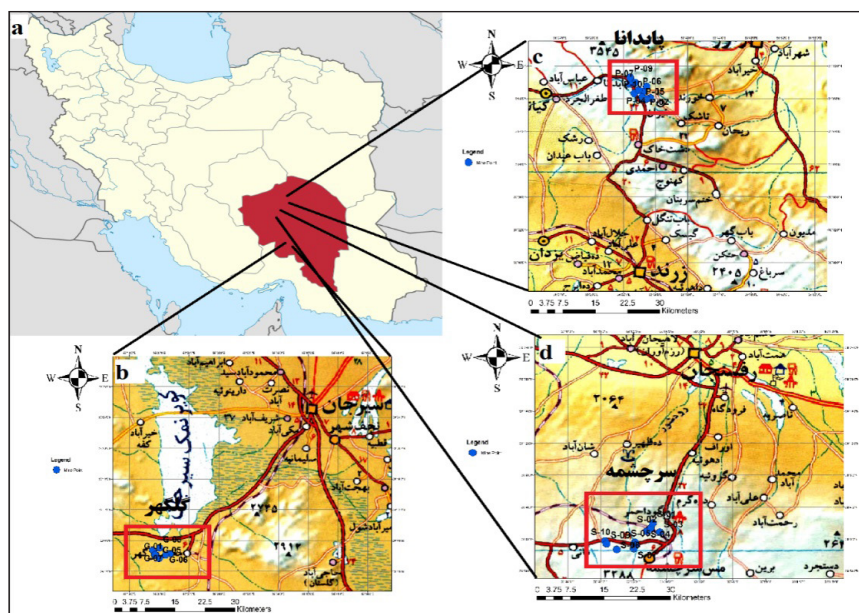
پراکنندگی واحدهای سنگی، گسل‌ها و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در سه گستره معدنی مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. گستره معدنی سنگ آهن گل‌گهر در حاشیه جنوب‌خاوری پهنه ساختاری سندانج-سیرجان و در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ نیریز قرار دارد (آقاباتی، ۱۳۸۹؛ Valeh et al., 1985). ذخیره آهن این گستره عمدتاً از مگنتیت تشکیل شده و سنگ‌های دربرگیرنده آن شامل گنیس، شیست، مرمر، متابازالت و آمفیبولیت با سن نوپروتروزیوئیک پسین هستند (Alibabaie et al., 2020). سطح گستره نمونه‌برداری بیشتر با نهشته‌های آبرفتی جوان، کنگلومرای رودخانه‌ای، رسوبات دامنه‌ای و پادگانه‌های (Terraces) دره‌ای کوآترنری پوشیده شده است (Sabzehei et al., 1997؛ شکل ۲-ا). کفه نمکی خیرآباد در فروافتادگی ساختاری شمال این گستره و در ارتباط با عملکرد گسل‌های منطقه شکل گرفته است (جعفری و همکاران، ۱۴۰۳). از نظر هیدروژئولوژی، دو واحد آب‌دار شامل آب‌خوان آبرفتی و آب‌خوان سنگ‌سخت در این گستره گزارش شده است و لایه نفوذناپذیر پیوسته‌ای میان آن‌ها وجود ندارد (Jahanshahi and Zare, 2017). میان کفه نمکی خیرآباد و بخشی از آب‌های زیرزمینی گودال معدنی شماره ۲ ارتباط هیدرولیکی و هیدروژئوشیمیایی وجود دارد؛ باین‌حال، شوری آب‌خوان سنگ‌سخت را نمی‌توان فقط به کفه نمکی نسبت داد و نقش آب‌های سازندی، شورابه‌های ژرفی و اختلاط نیز باید در نظر گرفته شود (جعفری و همکاران، ۱۴۰۳).

اثبات نمی‌کند. از این‌رو، نتایج روش‌های آماری و نموداری باید همراه با اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی، نوع منبع آب و موقعیت نقاط نمونه‌برداری تفسیر شوند. منابع آب می‌توانند در مطالعات ژئوشیمی اکتشافی نیز به عنوان محیط نمونه‌برداری استفاده شوند؛ زیرا آب در مسیر حرکت خود با سنگ‌ها، کانی‌ها و بخش‌های غنی از مواد معدنی واکنش می‌دهد و بخشی از ترکیبات حاصل را به نقاط دیگر منتقل می‌کند. به همین دلیل، هیدروژئوشیمی، به‌ویژه در مناطقی با پوشش سطحی ستر یا ذخایر معدنی ژرف، به عنوان یکی از روش‌های مکمل پی‌جویی مواد معدنی مورد توجه قرار گرفته است (Leybourne and Cameron, 2010; Kidder et al., 2022). باین‌حال، تفسیر ناهنجاری‌های شیمیایی آب بدون شناخت رخساره هیدروژئوشیمیایی، میزان شوری و اثر فرایندهایی مانند تبخیر، اختلاط و واکنش آب-سنگ ممکن است سبب شود ناهنجاری‌های طبیعی یا محلی به اشتباه به وجود ذخایر معدنی نسبت داده شوند. بنابراین، بررسی یون‌های عمده و طبقه‌بندی هیدروژئوشیمیایی نمونه‌ها، اطلاعات پایه لازم را برای تفسیر داده‌های ژئوشیمی اکتشافی فراهم می‌کند، اما به‌تنهایی نمی‌تواند وجود، نوع یا منشأ یک ذخیره معدنی را اثبات کند.

در ایران، مطالعات مختلفی درباره ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب در گستره‌های معدنی انجام شده است. ناصری و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که انحلال کانی‌های کربناته و عبور آب از لایه‌های زغال‌سنگی در تغییر ترکیب شیمیایی منابع آب منطقه زیرآب نقش دارند. ولی‌نیا و همکاران (۱۳۹۹) با بررسی نواحی پایین‌دست معدن مس سرچشمه، تفاوت شدت اثر فعالیت‌های معدنی بر آب‌های سطحی و زیرزمینی را گزارش کردند. جان‌جانه و ناصری (۱۳۹۳) نیز شوری زیاد منابع آب دشت قطارینه در مجاورت معدن گل‌گهر و احتمال نفوذ آب شور به آب‌خوان را مطرح کردند. جعفری و همکاران (۱۴۰۳) با بررسی منشأ شوری آب زیرزمینی معدن شماره ۲ گل‌گهر و کفه نمکی خیرآباد، نقش انحلال‌هالیت، اختلاط و تبادل کاتیونی را در شکل‌گیری ترکیب شیمیایی آب‌ها ارزیابی کردند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب در هر گستره معدنی به شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی همان گستره وابسته است.

مطالعات انجام‌شده در سایر کشورها نیز تفاوت رفتار منابع آب در گستره‌های معدنی را تایید کرده‌اند. کوسیمی (Kusimi and Kusimi, 2012) با بررسی منابع آب در منطقه معدنی تارکوا در غنا، ارتباط کیفیت آب با زمین‌شناسی منطقه و فعالیت‌های استخراج طلا را نشان داد. لیو و همکاران (Liu et al., 2017) گزارش کردند که در یک گستره زغال‌سنگی، اختلاط، تبخیر، انحلال و رسوب کانی‌ها و تبادل یونی می‌توانند به‌طور هم‌زمان ترکیب شیمیایی آب‌خوان‌های مختلف را کنترل کنند. چین و همکاران (Qin et al., 2019) برای گستره یک معدن متروکه سرب و روی نشان دادند که برای تفسیر تغییرات شیمیایی آب باید ساختار آب‌خوان و مسیرهای جریان نیز در نظر گرفته شوند. ژو و همکاران (Zhou et al., 2020) در یک گستره زغال‌سنگی و بوکار و همکاران (Bokar et al., 2020) در گستره یک معدن طلا نیز تفاوت اثر فعالیت‌های معدنی بر منابع آب و اجزای محیط پیرامون را گزارش کردند. در مجموع، نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که نمی‌توان یک الگوی هیدروژئوشیمیایی مشخص را به همه گستره‌های معدنی تعمیم داد.

با وجود مطالعات پیشین، بیشتر پژوهش‌ها بر یک معدن یا یک آب‌خوان متمرکز بوده‌اند و استفاده از روش‌های تحلیلی یکسان برای شناسایی شباهت‌ها و تفاوت‌های گستره‌های معدنی مختلف کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، گستره‌های سنگ آهن گل‌گهر، مس پورفیری سرچشمه و زغال‌سنگ پابدانا به عنوان سه مطالعه موردی مستقل با شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی متفاوت بررسی شده‌اند و هیچ ارتباط هیدرولیکی میان آن‌ها در نظر گرفته نشده است. مقایسه این سه گستره با هدف رتبه‌بندی کیفیت منابع آب یا نسبت دادن تفاوت‌های مشاهده‌شده فقط به نوع ماده معدنی انجام نشده است؛ بلکه هدف از این مقایسه، استفاده از یک روش تحلیلی مشترک برای جدا کردن ویژگی‌های وابسته به شرایط محلی از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به گستره‌های معدنی مورد مطالعه: (a) جایگاه استان کرمان در نقشه تقسیمات کشوری ایران؛ (b) گستره معدنی سنگ آهن گل گهر؛ (c) گستره معدنی مس سرچشمه؛ (d) گستره معدنی زغال سنگ پابدانا در اطلس ۱:۱۰۰۰۰۰ راه‌های ایران (سازمان نقشه برداری، ۱۴۰۳).

Figure 1. Geographical locations and access roads of the studied mining areas: a) location of Kerman Province on the administrative map of Iran; b) Gol-e Gohar iron-ore mining area; c) Sarcheshmeh copper mining area; and d) Pabdana coal mining area. Source of the 1:100,000 Atlas of Iran's Roads (National Cartographic Center, 2024).

متفاوتی دارند (معین‌السادات و رضوی، ۱۳۷۲). عملکرد گسل‌ها، چین‌خوردگی و تغییر شکل زمین‌ساختی موجب شده است شیب لایه‌های زغال‌دار از نزدیک صفر تا حدود ۹۰ درجه تغییر کند (حسینی، ۱۳۸۳). نقاط نمونه‌برداری در واحدهای زغال‌دار سازند هجدک، سازند بادامو، سنگ‌های وابسته به گروه شمشک، واحدهای آهکی و نهشته‌های آبرفتی قرار گرفته‌اند (شکل ۲-۲). منابع بررسی شده در این گستره شامل چشمه‌ها، چاه‌ها، آب معدن زیرزمینی و آب تجمع‌یافته در گودال روباز خمرود هستند؛ از این رو، نوع منبع آب و واحد زمین‌شناسی پیرامون آن در تفسیر داده‌های هیدروژئوشیمیایی در نظر گرفته شده است.

۲-۳- نمونه‌برداری منابع آب و سنجش شیمیایی

به منظور بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب در گستره‌های معدنی گل گهر (GW)، سرچشمه (SW) و پابدانا (PW)، در اردیبهشت ۱۴۰۳ در مجموع ۲۸ نمونه آب برداشت شد. این مجموعه شامل ۹ نمونه از گستره معدنی گل گهر، ۹ نمونه از گستره معدنی سرچشمه و ۱۰ نمونه از گستره معدنی پابدانا بود. شبکه نمونه‌برداری از ۱۸ دهنه چشمه، ۷ حلقه چاه، یک نمونه از آب تجمع‌یافته در گودال روباز، یک نمونه از آب معدن زیرزمینی و یک نمونه از آب زهکش معدن تشکیل شد. نقاط نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شدند که تنوع منابع آب و شرایط زمین‌شناسی و معدنی هر سه گستره را پوشش دهند. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۲ نشان داده شده است.

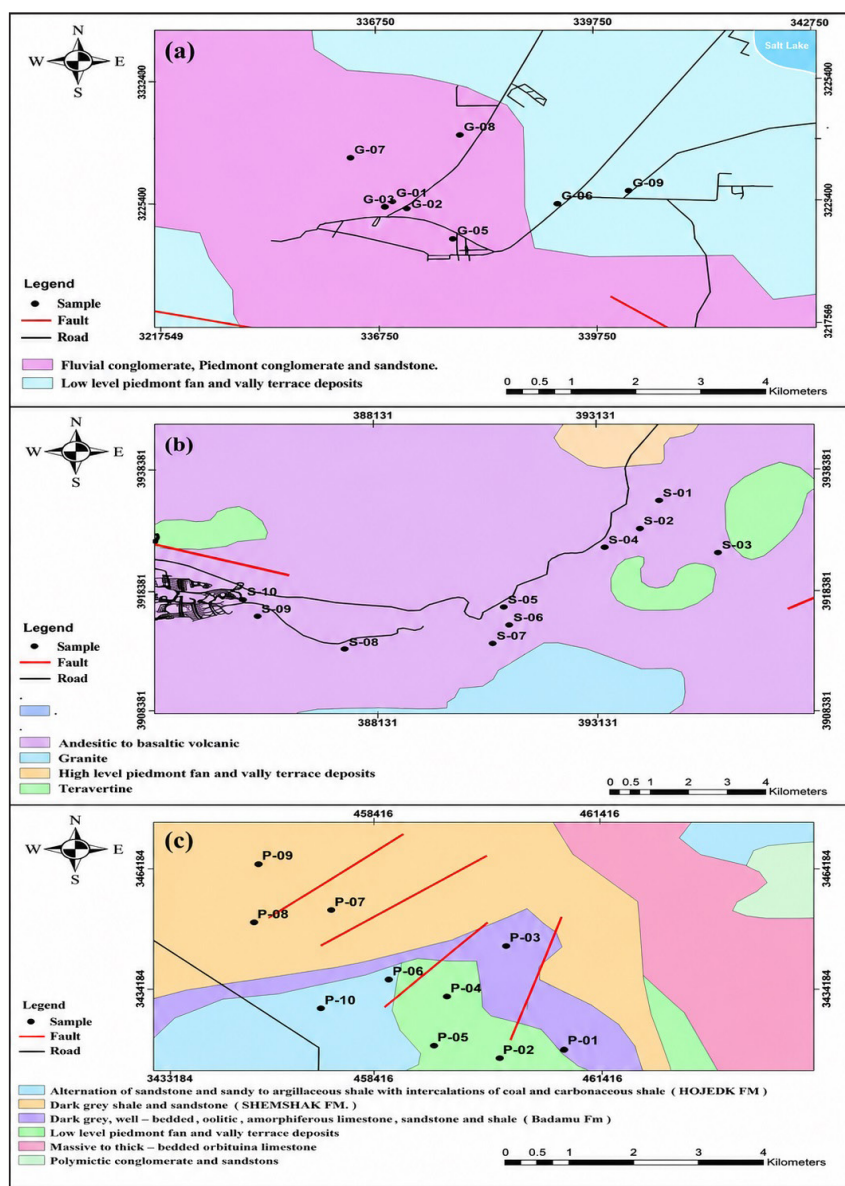
مقادیر pH، هدایت الکتریکی (EC) و دمای آب هم‌زمان با نمونه‌برداری و استفاده از دستگاه چند پارامتری قابل حمل HACH HQ40D اندازه‌گیری شدند. نمونه‌ها پس از برداشت از صافی غشایی با اندازه منافذ ۰/۴۵ میکرومتر عبور داده شدند و در ظروف پلی‌اتیلنی تمیز جمع‌آوری شدند. نمونه‌های اختصاص‌یافته به اندازه‌گیری کاتیون‌ها با اسید نیتریک تا رسیدن به pH کمتر از ۲ اسیدی شدند؛

گستره معدنی مس سرچشمه در پهنه ساختاری ارومیه-دختر، در مجموعه آتشفشانی - رسوبی پاریز از کمر بند دهج-ساردوئیه و در محدوده نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ رفسنجان و سیرجان قرار دارد (آقایی، ۱۳۸۹؛ Soheili et al., 1995; Zohrehbakhsh and Vahdati Daneshmand, 1992). واحدهای اصلی منطقه شامل سنگ‌های رسوبی کرتاسه پسین، سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن و توده‌ها و دایک‌های پورفیری میوسن هستند (Shahabpour, 1982). تشکیل ذخیره مس سرچشمه با نفوذ توده‌های پورفیری گرانودیوریتی و فعالیت‌های ماگمایی-گرمایی وابسته به آن ارتباط دارد (Shahabpour, 1982; Boomeri et al., 2010). سنگ‌های منطقه به‌طور گسترده تحت‌تأثیر دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک، آرژلیک و پروپلیتیک قرار گرفته‌اند و کالکوپریت، پیریت و مولیبدنیت از مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی آن هستند (Boomeri et al., 2010). نقاط نمونه‌برداری در مجاورت واحدهای آتشفشانی آندزیتی تا بازالتی، توده‌های گرانیتی، نهشته‌های آبرفتی و رخنمون‌های تراورتن قرار دارند (شکل ۲-۲). تغییر کیفیت برخی منابع آب پیرامون معدن نیز با ورود زه‌آب‌های معدنی ارتباط داده شده است (Doulati Ardejani et al., 2008).

گستره معدنی زغال‌سنگ پابدانا در پهنه ساختاری ایران مرکزی و در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ راور قرار دارد (آقایی، ۱۳۸۹؛ Mahdani, 1996). توالی زمین‌شناسی منطقه به‌طور عمده از سنگ‌های رسوبی مزوزوییک تشکیل شده و واحدهای رخنمون‌یافته آن، از قدیم به جدید، شامل سازندهای شتری، ناینده، آب‌حاجی، بادامو و هجدک هستند (Huckriede et al., 1962). توالی زغال‌دار این گستره از تریاس پسین تا ژوراسیک میانی گسترش دارد و به‌طور عمده شامل تناوب ماسه‌سنگ، سیلت‌سنگ، شیل، رس‌سنگ و لایه‌های زغال‌سنگ است (Mehrabi et al., 2023). مهم‌ترین پهنه‌های زغال‌دار منطقه شامل باب‌نیزو، خمرود، دشت‌خاک، هجدک و بیدو هستند و هریک لایه‌های زغال‌سنگ با ستبرا و گسترش جانبی

دور از نور مستقیم نگهداری و برای انجام سنجش‌های شیمیایی به آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای استان تهران منتقل شدند.

در حالی که نمونه‌های مربوط به اندازه‌گیری آنیون‌ها بدون اسیدی‌سازی نگهداری شدند. تمامی نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت، در دمای حدود ۴ درجه سانتی‌گراد و



شکل ۲- نقشه واحدهای سنگی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در گستره‌های معدنی: (a) گل‌گهر؛ (b) سرچشمه؛ و (c) پابدانا (سامانه مختصات UTM، زون ۴۰ شمالی).

Figure 2. Geological maps showing the rock units and sampling locations in the mining areas: a) Gol-e- Gohar; b) Sarcheshmeh; and c) Pabdana (UTM Zone 40N).

آنیون‌های اصلی شامل سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم مطابق استاندارد Appelo and Postma, 2005; (Clark, 2015) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$\text{CBE (\%)} = \frac{(\Sigma \text{C}^+ - \Sigma \text{A}^-) / (\Sigma \text{C}^+ + \Sigma \text{A}^-)}{1} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، ΣC^+ و ΣA^- به ترتیب مجموع غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر هستند. قدر مطلق خطای تعادل بار الکتریکی نمونه‌ها بین ۰/۱۷ تا ۴/۶۸ درصد به دست آمد و در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۵ درصد بود. این مقادیر نشان‌دهنده سازگاری قابل قبول نتایج تجزیه شیمیایی هستند.

کاتیون‌های اصلی شامل سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم مطابق استاندارد ISO 14911:1998 و آنیون‌های کلرید و سولفات مطابق استاندارد ISO 10304-1:2007، با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی یونی (S150, Sykam, Germany) اندازه‌گیری شدند. غلظت بی‌کربنات نیز به روش تیتراسیون اسید-باز تعیین شد (APHA, 2017). نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و غلظت یون‌های اصلی نمونه‌های آب در جدول ۱ ارائه شده است.

برای بررسی سازگاری نتایج تجزیه شیمیایی، درصد خطای تعادل بار الکتریکی (Charge Balance Error; CBE) بر اساس اختلاف مجموع کاتیون‌ها و

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و غلظت یون‌های اصلی نمونه‌های آب گستره‌های معدنی سنگ آهن گل گهر (GW)، مس سرچشمه (SW) و زغال سنگ پابدانا (PW) در اردیبهشت ۱۴۰۳.

Table 1. Physicochemical properties and major-ion concentrations of water samples from the Gol-e- Gohar iron-ore (GW), Sarcheshmeh copper (SW), and Pabdana coal (PW) mining areas in May 2024.

Water source	Sample ID	TDS (mg/L)	EC (μS/cm)	pH	HCO ₃ (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)
Pit 2 northern-wall spring	GW-01	50762	96800	6.9	486	33965	2399	2300	221	19956	66
Pit 2 eastern-wall spring	GW-02	19941	40200	7	296	9600	3912	2850	180.3	5120	66
Pit 2 southern-wall spring	GW-03	51600	102700	6.88	396	36006	2420	2360	269	21044	53.06
Pit 2 western-wall spring	GW-04	38600	78100	6.5	400	25685	2423	1435	423	16532	68
Well near Pit 1	GW-05	11819	17780	7.45	146.4	7106.76	2574.45	1193.87	173.47	3661.68	34.76
Well near Pit 3	GW-06	7077	10720	7.24	107.36	4558.56	743.13	910.18	152.51	1905.21	42.72
Northwestern observation well	GW-07	6133	9140	8.55	97.6	5558.56	287.71	325.05	66.08	3012.25	24.2
Northeastern observation well	GW-08	8377	13650	6.82	122	6146.72	940.72	553.29	78.9	3289.58	13.62
Well near the administrative building	GW-09	11873	16980	6.74	78.08	6735.62	997.24	558.25	153.29	3605.36	13.52
Khomrud-e Bala village spring	PW-01	1368.8	2360	7.78	186.05	466.1	178.9	86.09	42.64	276	7.24
Khomrud-e Pa'in village spring	PW-02	363	725	7.63	320	15	70	58.6	16	47	44
Mohammad Amin village spring	PW-03	724.4	1249	7.66	172.63	179.27	144	48.66	34.53	138	8.14
Khomrud open-pit lake	PW-04	5649.2	9740	7.6	179.34	1885.05	1893.1	344	362.4	1037.3	50.07
Khomrud abandoned-mine well	PW-05	482.9	878	7.89	321.47	63.07	56.96	42	26.2	96.14	4.88
Khomrud underground-mine water	PW-06	718.85	1307	7.29	328.18	89.46	79.17	52.68	30.13	97.75	5.62
Begeshtu'iyeh village spring	PW-07	380.05	691	8.1	254.37	25.83	37.22	28.76	12.34	82.57	5.38
Banan village artesian well	PW-08	318	635	7.33	200	21	80	23.4	24.2	40	26
Mursi village spring	PW-09	451	903	7.69	265	21	132	54	33	48	14
Banan village spring	PW-10	556.6	1012	7.6	349.53	30.95	72	74	18	61.64	5.28
Emamzadeh Abdullah village spring	SW-01	439.4	799	7.26	403.21	13.57	41.62	105.2	8.4	39.1	7.26
Moghuiyeh village spring	SW-03	455.9	829	7.86	270.23	46.15	57.6	82	15.6	34.5	7.8
Bozgir village spring	SW-04	361.3	657	7.9	215.94	71	39.78	86.4	11.08	34.5	5.98
Sarcheshmeh mine-drainage water	SW-05	1480	2960	6.1	165	156	1220	340	50	216.5	5.62
Spring east of the Sarcheshmeh copper plant	SW-06	196.3	357	7.76	212.65	7.1	10.41	34.6	10.09	25.3	2.93
Spring southeast of the Sarcheshmeh copper plant	SW-07	152.3	277	7.74	183.61	5.5	3.43	44.44	4.85	11.5	5.23
Bagh-e Sanat spring	SW-08	623.7	1034	7.36	250.71	159.7	129.4	82	25.02	115	3.79
Spring between Sarcheshmeh village and Bagh-e Sanat	SW-09	517.9	893	7.4	290.69	48	80.26	88.67	11.8	38.3	8.87
Sarcheshmeh village spring	SW-10	748.5	1361	7.19	408.7	159.7	31.21	145.5	13.2	76.3	8.92

۴-۲- روش شناسی

برای تفسیر ویژگی‌های هیدروژنوشیمیایی نمونه‌ها، از نمودار پایپر، نمودار گیبس، رابطه Na-Cl، شاخص‌های کلروآلکانل، نمودارهای دومتغیره و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی استفاده شد. پیش از انجام محاسبات، غلظت یون‌های اصلی از میلی‌گرم بر لیتر به میلی‌اکی‌والان بر لیتر تبدیل شد. تیپ و رخساره هیدروشیمیایی نمونه‌ها بر اساس سهم نسبی کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی در نمودار پایپر تعیین شد (Piper, 1944). برای ارزیابی گرایش کلی فرایندهای موثر بر شیمی آب نیز نسبت‌های $Cl/(Cl+HCO_3)$ و $Na/(Na+Ca)$ برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر، در برابر TDS رسم شدند (Gibbs, 1970). رابطه Na و Cl نسبت به خط ۱:۱ برای بررسی بیشتر یا کمتر بودن نسبی این یون‌ها به کار رفت. همچنین، برای بررسی رابطه یون‌های اصلی با TDS، داده‌های هر گستره به‌طور جداگانه تحت تبدیل لگاریتمی پایه ۱۰ قرار گرفتند و رگرسیون خطی بر داده‌های تبدیل‌شده انجام شد. شدت رابطه متغیرها با استفاده از ضریب تعیین (R^2) ارزیابی شد؛ باین حال، این روابط تنها به‌عنوان شواهد آماری مکمل تفسیر شدند و به‌تنهایی مبنای تعیین منشأ یون‌ها قرار نگرفتند (Hem, 1985; Appelo and Postma, 2005).

برای ارزیابی جهت احتمالی تبادل کاتیونی، شاخص‌های کلروآلکانل CAI-I و CAI-II بر اساس غلظت معادل یون‌ها و مطابق روابط ۲ و ۳ محاسبه شدند (Schoeller, 1965):

$$CAI-I = [Cl - (Na + K)] / Cl \quad \text{رابطه ۲}$$

$$CAI-II = [Cl - (Na + K)] / (HCO_3 + SO_4) \quad \text{رابطه ۳}$$

مقادیر مثبت این شاخص‌ها با جذب Na و K موجود در آب در جایگاه‌های تبادلی و آزادشدن Ca و Mg از فاز جامد سازگار هستند. در مقابل، مقادیر منفی نشان‌دهنده آزادشدن Na و K از جایگاه‌های تبادلی و جذب Ca و Mg موجود در آب‌اند. مقادیر نزدیک به صفر نیز بیانگر نقش محدود تبادل کاتیونی در تغییر ترکیب شیمیایی آب هستند. نتایج این شاخص‌ها همراه با نمودار Na-Cl، نوع سنگ، شرایط زمین‌شناسی و موقعیت نقاط نمونه‌برداری تفسیر شدند؛ زیرا این روابط به‌تنهایی منشأ دقیق یون‌ها یا وقوع قطعی تبادل کاتیونی را اثبات نمی‌کنند (Appelo and Postma, 2005; Liu et al., 2015).

تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی بر پایه غلظت یون‌های HCO_3 ، Cl ، SO_4 ، Ca ، Mg ، Na و K و به‌صورت جداگانه برای هر گستره معدنی انجام شد. برای کاهش اثر

نمونه، با تأثیر زهکشی معدن و اکسایش احتمالی کانی‌های سولفیدی سازگار است. با این حال، pH برابر با ۶/۱۰ نشان می‌دهد که این نمونه در محدوده نزدیک به خنثی قرار دارد و نمی‌توان آن را زه آب اسیدی شدید در نظر گرفت (Nordstrom, 2011). واکنش‌های خنثی‌کننده در تماس با کانی‌های کربناته و سیلیکاته نیز ممکن است بخشی از اسیدیته تولیدشده را کاهش داده باشند (Appelo and Postma, 2005).

کمترین مقادیر هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول سرچشمه در نمونه‌های SW6 و SW7، واقع در خاور و جنوب‌خاور کارخانه مس سرچشمه، ثبت شده است. هدایت الکتریکی نمونه‌های SW8 و SW10 نیز به ترتیب ۱۰۳۴ و ۱۳۶۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است و از مقادیر ثبت‌شده در نمونه‌های SW1 و SW3 بیشتر می‌باشد. قرارگیری SW8 و SW10 در مجاورت پهنه‌های دگرسانی فلیک و آرژلیک، احتمال تأثیر بیشتر واکنش آب با سنگ‌های دگرسان‌شده را مطرح می‌کند (شکل ۳). اکسایش کانی‌های سولفیدی، انحلال کانی‌های کربناته و سولفات و هوازدگی کانی‌های سیلیکاته نیز از فرایندهای موثر بر شیمی آب در این گستره هستند (Sahraei Parizi and Samani, 2013). با این حال، هم‌مکانی نمونه‌ها با پهنه‌های دگرسانی به‌تنهایی برای اثبات نقش انحلال کانی‌های رسی کافی نیست و باید همراه با ترکیب یونی و نمودارهای هیدروژئوشیمیایی تفسیر شود.

در گستره معدنی پادانا، هدایت الکتریکی نمونه‌ها بین ۶۳۵ تا ۹۷۴۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، مقدار کل جامدات محلول بین ۳۱۸ تا ۵۶۴۹/۲ میلی‌گرم بر لیتر و pH بین ۷/۲۹ تا ۸/۱۰ متغیر است. بیشترین مقادیر هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول در نمونه PW4، برداشت‌شده از آب تجمع‌یافته در گودال روباز خمروود است. غلظت کلرید، سولفات و سدیم در این نمونه به ترتیب ۱۸۹۳۰/۱۰، ۱۸۸۵/۵۰ و ۱۰۳۷/۳۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. تجمع آب در کف گودال و تماس آن با دیواره‌ها و رسوبات، احتمال افزایش غلظت مواد محلول بر اثر تبخیر و واکنش آب با مواد زمین‌شناسی پیرامون گودال را مطرح می‌کند (Appelo and Postma, 2005; Early, 1999). با این حال، غلظت زیاد سدیم و کلرید به‌تنهایی برای اثبات انحلال هالیت کافی نیست و این موضوع باید با استفاده از روابط یونی بررسی شود.

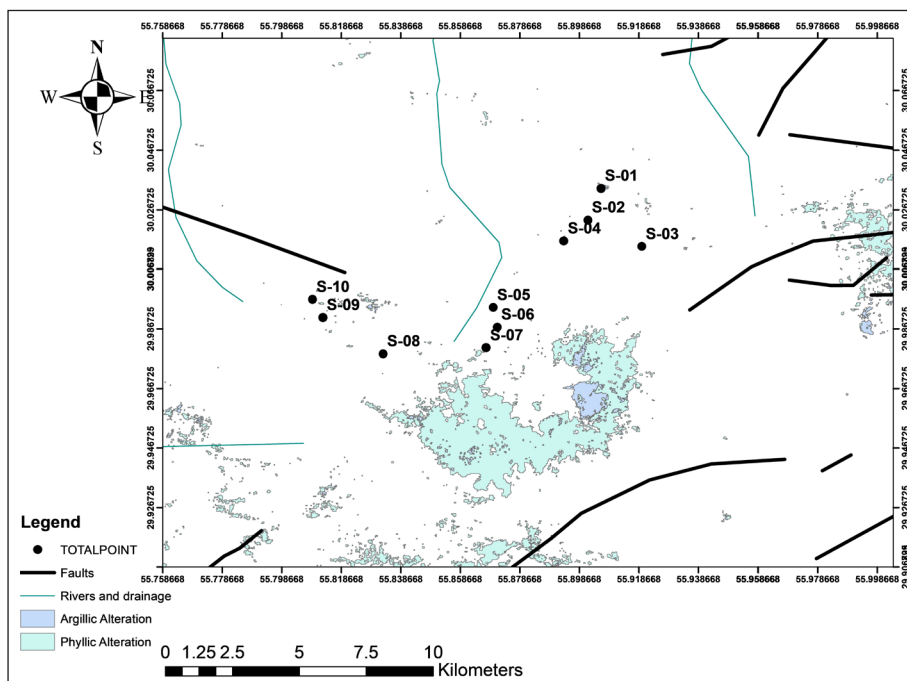
تفاوت مقیاس و دامنه تغییرات متغیرها، داده‌های هر گستره پیش از تحلیل با روش Min-Max به‌نجارسازی شدند. فاصله اقلیدسی به‌عنوان معیار سنجش تفاوت میان نمونه‌ها و روش پیوند Ward برای تشکیل خوشه‌ها به کار رفت. تعداد خوشه‌ها با توجه به ساختار شاخه‌ها و جهش‌های اصلی فاصله پیوندی در نمودارهای درختی (dendrogram) تعیین شد. تحلیل خوشه‌ای تنها برای شناسایی نمونه‌های مشابه و بررسی ناهمگنی درون هر گستره به کار رفت و نتایج آن همراه با رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی، مقدار شوری، نوع منبع آب و شرایط زمین‌شناسی تفسیر شدند (Güler et al., 2002; Ayenew et al., 2009; Fabbrocino et al., 2019; Das et al., 2022).

۳- داده‌ها و اطلاعات و بحث

۳-۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منابع آب

بر پایه داده‌های جدول ۱، هدایت الکتریکی نمونه‌های آب گستره معدنی گل‌گهر بین ۹۱۴۰ تا ۱۰۲۷۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، مقدار کل جامدات محلول بین ۶۱۳۳ تا ۵۱۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و pH بین ۶/۵ تا ۸/۵۵ متغیر است. بیشترین مقادیر هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول در نمونه GW3 و کمترین مقادیر آن‌ها در نمونه GW7 ثبت است. هدایت الکتریکی نمونه‌های برداشت‌شده از چشمه‌های دیواره گودال معدنی شماره ۲، شامل GW1 تا GW4، بین ۴۰۲۰۰ تا ۱۰۲۷۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است؛ در حالی که این مقدار در چاه‌های اطراف گودال، شامل GW5 تا GW9، بین ۹۱۴۰ تا ۱۷۷۸۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر تغییر می‌باشد. این اختلاف نشان می‌دهد که آب‌های مرتبط با دیواره گودال معدنی شماره ۲ در مقایسه با چاه‌های اطراف، شوری و مواد محلول بیشتری دارند.

در گستره معدنی سرچشمه، هدایت الکتریکی نمونه‌ها بین ۲۷۷ تا ۲۹۶۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، مقدار کل جامدات محلول بین ۱۵۲ تا ۱۴۸۰ میلی‌گرم بر لیتر و pH بین ۷/۹۰ تا ۷/۹۰ متغیر است. بیشترین مقادیر هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول و کمترین مقدار pH در نمونه آب زهکش معدن SW5 است. همراهی هدایت الکتریکی و غلظت زیاد سولفات، برابر با ۱۲۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، با pH پایین‌تر در این



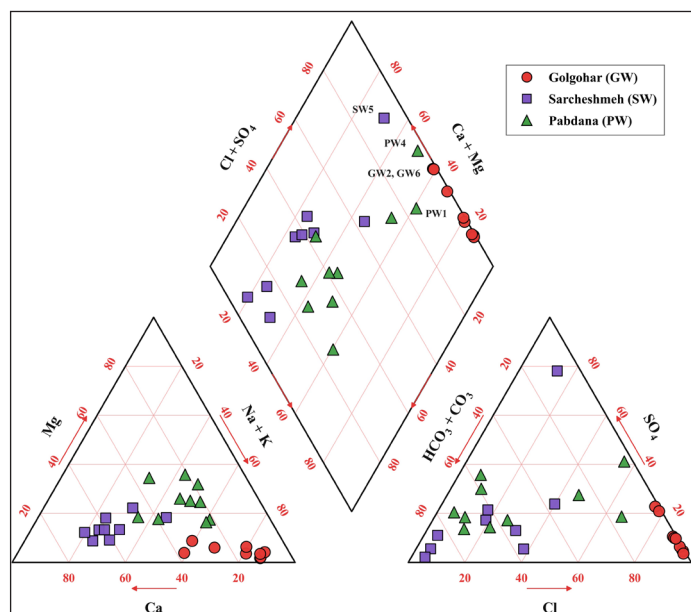
شکل ۳- پراکندگی پهنه‌های دگرسانی فلیک و آرژلیک و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در گستره معدنی مس سرچشمه.

Figure 3. Spatial distribution of phyllic and argillic alteration zones and sampling locations in the Sarcheshmeh copper mining area.

۳-۲- نوع و رخساره‌های هیدروشیمیایی

نمودار پایپر یکی از روش‌های متداول برای مقایسه ترکیب یونی آب‌ها و تعیین نوع (تیپ) و رخساره‌های هیدروشیمیایی است (Piper, 1944). موقعیت نمونه‌های گل‌گهر در این نمودار نشان می‌دهد که تمامی آن‌ها دارای رخساره Na-Cl هستند (شکل ۴). سهم بی‌کربنات در این نمونه‌ها ناچیز است و سهم سولفات، به‌جز در نمونه‌های GW2 و GW5، کمتر از ۲۰ درصد است. همچنین، هدایت الکتریکی نمونه‌ها بین ۹۱۴۰ تا ۱۰۲۷۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر تغییر می‌کند که نشان‌دهنده شوری زیاد آب‌های این گستره است. این الگو، همراه با موقعیت معدن در مجاورت کفه نمکی و ارتباط گزارش‌شده میان کفه نمکی خیرآباد و بخشی از آب‌های زیرزمینی گودال معدنی شماره ۲، احتمال اختلاط آب‌های گستره معدن با شورابه کفه نمکی را تقویت می‌کند (جعفری و همکاران، ۱۴۰۳). با این حال، تعیین مقدار این اختلاط به داده‌های تکمیلی، مانند ترکیب ایزوتوپی و مدل‌سازی اختلاط، نیاز دارد.

کمترین مقادیر هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول پابدانا در نمونه PW8 است. نمونه PW7 نیز با هدایت الکتریکی ۶۹۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، شوری به‌نسبت کمی داشت. اختلاف آشکار میان PW4 و سایر نمونه‌های پابدانا نشان‌دهنده ناهمگنی مکانی شیمی آب و تاثیر شرایط ویژه محل نمونه‌برداری در این گستره است. در مجموع، ۳ گستره معدنی الگوهای فیزیکو-شیمیایی متفاوتی دارند. نمونه‌های گل‌گهر دارای بیشترین دامنه شوری و مواد محلول می‌باشند؛ بیشتر نمونه‌های سرچشمه، به‌جز آب زهکش معدن SW5، مقادیر کمتری دارند و نمونه‌های پابدانا نیز، به‌جز PW4، هدایت الکتریکی و کل جامدات محلول کمتری نسبت به گل‌گهر دارند. هدف از این مقایسه، رتبه‌بندی کیفیت آب سه معدن یا نسبت‌دادن تفاوت‌ها فقط به نوع ماده معدنی نیست؛ بلکه این مقایسه مبنایی برای تفکیک الگوهای هیدروشیمیایی و ارزیابی نقش شرایط زمین‌شناسی، موقعیت هیدروژئولوژی، زهکشی معدن، تبخیر و واکنش آب-سنگ در هر گستره فراهم می‌کند.



شکل ۴- نمودار پایپر نمونه‌های آب گستره‌های معدنی گل‌گهر (GW)، سرچشمه (SW) و پابدانا (PW).

Figure 4. Piper diagram of water samples from the Gol-e Gohar (GW), Sarcheshmeh (SW), and Pabdana (PW) mining areas.

PW1، PW3 و PW4، کلرید بیشترین سهم آنیونی را به خود اختصاص می‌دهد. نمونه PW1 دارای رخساره Na-Cl است و نمونه PW3 نیز به این رخساره گرایش دارد. نمونه PW4 از نظر ترکیب آنیونی، وضعیت انتقالی کلروره-سولفات و از نظر ترکیب کاتیونی، حالت مختلط با سهم نسبی بیشتر سدیم را نشان می‌دهد. اگرچه مجموع سدیم و پتاسیم در ۸ نمونه بیشترین سهم کاتیونی را دارد، سهم آن تنها در نمونه‌های PW5، PW3، PW1 و PW7 بیشتر از ۵۰ درصد است. رخساره Na-HCO₃ در نمونه‌های PW5 و PW7 نشان‌دهنده غنی‌شدگی نسبی سدیم است؛ با این حال، نسبت‌دادن این ویژگی به تبادل کاتیونی به بررسی شاخص‌های اختصاصی تبادل یونی نیاز دارد.

در مجموع، مقایسه رخساره‌ها با هدف رتبه‌بندی ۳ معدن یا نسبت‌دادن مستقیم ترکیب آب به نوع ماده معدنی انجام نشده است؛ بلکه این مقایسه برای تفکیک الگوهای هیدروشیمیایی و شناسایی عوامل کنترل‌کننده ترکیب آب در شرایط

در گستره معدنی سرچشمه، بیشتر نمونه‌ها دارای رخساره Ca-HCO₃ هستند؛ به‌طوری‌که کلسیم در ۸ نمونه بیشترین سهم کاتیونی و بی‌کربنات در ۷ نمونه بیشترین سهم آنیونی را دارد. در مقابل، نمونه SW5 با رخساره Ca-SO₄ و نمونه SW8 با ترکیب یونی مختلط از سایر نمونه‌ها متمایز می‌شوند. سهم زیاد سولفات در SW5، همراه با کمترین مقدار pH برابر با ۶/۱ و بیشترین هدایت الکتریکی برابر با ۲۹۶۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، می‌تواند با اکسایش کانی‌های سولفیدی یا انحلال کانی‌های سولفات مرتبط باشد (Nordstrom, 2011; Sahraei Parizi and Samani, 2013). با این حال، تفکیک سهم هریک از این فرایندها به شواهد تکمیلی، مانند شاخص‌های اشباع و بررسی‌های کانی‌شناسی، نیاز دارد.

در گستره معدنی پابدانا، رخساره‌های هیدروشیمیایی تنوع بیشتری دارند و بیشتر نمونه‌ها در محدوده رخساره‌های Ca-Mg-HCO₃ و Na-HCO₃ قرار می‌گیرند. بی‌کربنات در ۷ نمونه بیشترین سهم آنیونی را دارد؛ درحالی‌که در نمونه‌های

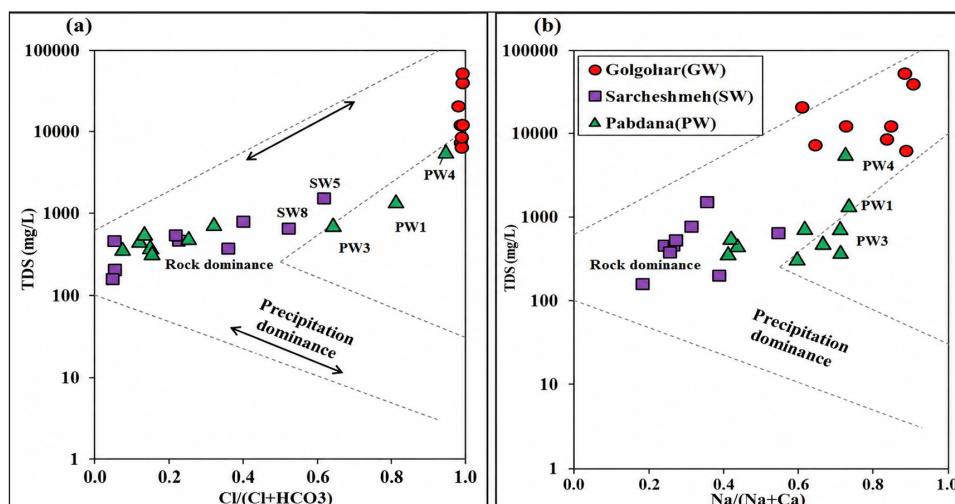
چند فرایند قرار گیرد، نتایج آن همراه با رخساره‌های هیدروشیمیایی، غلظت یون‌ها، موقعیت نقاط نمونه‌برداری و ویژگی‌های زمین‌شناسی تفسیر شدند (Marandi and Shand, 2018).

نمونه‌های گل‌گهر به سمت محدوده تبخیر-تبلور متمایل شده‌اند و مقادیر TDS آن‌ها نیز به‌طور محسوسی بیشتر از نمونه‌های دو گستره دیگر است. با این حال، این جایگاه به تنهایی رخداد تبخیر مستقیم را اثبات نمی‌کند؛ زیرا اختلاط با آب‌های شور و شورابه‌ها نیز می‌تواند موجب افزایش TDS و تغییر نسبت‌های یونی به کاررفته در نمودار گیبس شود. نمونه‌های GW5، GW2 و GW6 در نمودار کاتیونی، به دلیل سهم بیشتر کلسیم، در مقایسه با سایر نمونه‌های گل‌گهر به محدوده چیرگی برهم‌کنش آب-سنگ نزدیک‌ترند. همراهی این الگو با رخساره Na-Cl، شوری زیاد نمونه‌ها و شواهد پیشین درباره ارتباط هیدرولیکی و هیدروژئوشیمیایی آبخوان آبرفتی معدن با کفه نمکی خیرآباد، اثرپذیری آب‌های این گستره از شورابه کفه نمکی را محتمل می‌سازد (جعفری و همکاران، ۱۴۰۳). بنابراین، موقعیت نمونه‌های گل‌گهر در نمودار گیبس می‌تواند حاصل اثر هم‌زمان ورود آب شور، افزایش غلظت املاح بر اثر تبخیر و برهم‌کنش آب-سنگ باشد؛ هرچند تعیین سهم هریک از این فرایندها به داده‌های تکمیلی نیاز دارد.

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی متفاوت به کار رفته است. رخساره Na-Cl و شوری زیاد در گل‌گهر با اثرپذیری از منابع آب شور سازگار است؛ رخساره Ca-HCO₃ در بیشتر نمونه‌های سرچشمه با حضور آب‌های کم‌شورتر و واکنش آب-سنگ هماهنگی دارد؛ و تنوع رخساره‌ها در پابدانا، ناهمگنی شرایط هیدروشیمیایی و تفاوت مسیرهای تحول آب را نشان می‌دهد. بنابراین، ترکیب شیمیایی آب در این گستره‌ها تنها تابع نوع ماده معدنی نیست و عواملی مانند منشا آب، سنگ‌شناسی، واکنش آب-سنگ، زهکشی معدن و افزایش غلظت املاح بر اثر تبخیر نیز در شکل‌گیری آن نقش دارند.

۳-۳- ارزیابی عوامل موثر بر شیمی آب با نمودار گیبس

برای بررسی گرایش کلی فرایندهای موثر بر ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، از نمودار گیبس استفاده شد. در این نمودار، نسبت‌های $Na/(Na+Ca)$ و $Cl/(Cl+HCO_3)$ برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر، در برابر مقدار TDS رسم شدند و موقعیت نمونه‌ها با محدوده‌های چیرگی بارش، برهم‌کنش آب-سنگ و تبخیر-تبلور مقایسه شد (Gibbs, 1970؛ شکل ۵). از آنجا که نمودار گیبس در اصل برای آب‌های سطحی ارائه شده است و موقعیت نمونه‌های آب زیرزمینی در آن ممکن است تحت‌تأثیر



شکل ۵- نمودارهای گیبس نمونه‌های آب گستره‌های معدنی گل‌گهر (GW)، سرچشمه (SW) و پابدانا (PW): (a) نسبت $Cl/(Cl+HCO_3)$ و (b) نسبت $Na/(Na+Ca)$ در برابر TDS.

Figure 5. Gibbs diagrams of water samples from the Gol-e- Gohar (GW), Sarcheshmeh (SW), and Pabdana (PW) mining areas: a) $Cl/(Cl+HCO_3)$ and b) $Na/(Na+Ca)$ ratios versus TDS.

در گستره معدنی پابدانا نیز بیشتر نمونه‌ها در محدوده چیرگی برهم‌کنش آب-سنگ قرار دارند. در مقابل، نمونه‌های PW1، PW3 و به‌ویژه PW4 به سمت مقادیر بیشتر TDS و نسبت‌های یونی مربوط به محدوده تبخیر-تبلور متمایل شده‌اند. موقعیت PW4، همراه با بیشترین مقادیر EC و TDS و برداشت آن از آب تجمع‌یافته در گودال روباز خمرو، نقش افزایش غلظت املاح بر اثر تبخیر را در شوری این نمونه محتمل می‌سازد. گرایش PW1 و PW3 نیز نشان‌دهنده غنی‌شدگی نسبی کلرید و سدیم است؛ با این حال، تفکیک نقش تبخیر، انحلال مواد نمکی و اختلاط در این نمونه‌ها تنها بر پایه نمودار گیبس امکان‌پذیر نیست.

در مجموع، نمودار گیبس تفاوت الگوهای هیدروشیمیایی ۳ گستره را آشکار می‌کند. در گل‌گهر، اثر آب‌های شور و افزایش غلظت املاح برجسته‌تر است؛ در

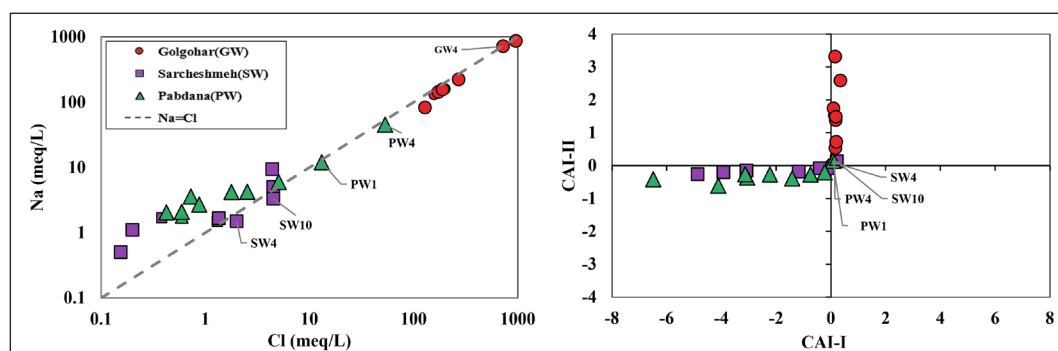
در گستره معدنی سرچشمه، بیشتر نمونه‌ها در محدوده چیرگی برهم‌کنش آب-سنگ قرار گرفته‌اند؛ این وضعیت با تأثیر انحلال کانی‌ها و واکنش آب با سنگ‌های دگرسان‌شده بر ترکیب شیمیایی آب سازگار است. نمونه SW5 بیشترین مقدار TDS را در میان نمونه‌های این گستره دارد و در مقایسه با سایر نمونه‌ها به سمت مقادیر بیشتر نسبت $Cl/(Cl+HCO_3)$ متمایل شده است. با این حال، با توجه به رخساره Ca-SO₄، غلظت زیاد سولفات و ارتباط این نمونه با زهکشی معدن، افزایش TDS آن را نمی‌توان تنها به تبخیر نسبت داد و فرایندهایی مانند اکسایش کانی‌های سولفیدی و انحلال کانی‌های سولفات نیز باید در نظر گرفته شوند. موقعیت حدواسط نمونه‌های SW5، SW8 و SW10 نیز می‌تواند نشان‌دهنده اثر هم‌زمان چند فرایند هیدروژئوشیمیایی باشد، اما به تنهایی اختلاط با آب‌های سازندی را اثبات نمی‌کند.

Na-Cl و شاخص‌های کلروآلکالن CAI-I و CAI-II استفاده شد (شکل ۶). خط ۱:۱ در نمودار Na-Cl نشان‌دهنده برابری غلظت معادل این دو یون است. انحراف نمونه‌ها از این خط می‌تواند با تبادل کاتیونی، هوازدهی کانی‌های سدیم‌دار یا اختلاط آب‌هایی با ترکیب متفاوت مرتبط باشد. مقادیر مثبت شاخص‌های CAI با جذب Na و K موجود در آب در جایگاه‌های تبدلی و آزادشدن Ca و Mg از فاز جامد سازگار است؛ در حالی که مقادیر منفی، آزادشدن Na و K از جایگاه‌های تبدلی و جذب Ca و Mg موجود در آب را نشان می‌دهند. با این حال، این شاخص‌ها به تنهایی منشأ دقیق یون‌ها را مشخص نمی‌کنند و باید همراه با شرایط زمین‌شناسی و ترکیب یونی نمونه‌ها تفسیر شوند (Schoeller, 1965; Appelo and Postma, 2005; Liu et al., 2015).

سرچشمه، برهم کنش آب-سنگ و در نمونه SW5 فرایندهای مرتبط با زهکشی معدن اهمیت بیشتری دارند؛ و در پابدانا، برهم کنش آب-سنگ همراه با اثر موضعی تبخیر، به‌ویژه در نمونه PW4، مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که تفاوت شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی ۳ گستره در شکل‌گیری پاسخ‌های هیدروشیمیایی متفاوت آن‌ها نقش دارد. از این رو، نمودار گیبس باید به‌عنوان شاهدهی تکمیلی و نه ابزاری مستقل برای تعیین منشأ آب یا شوری استفاده شود.

۴-۳- رابطه سدیم-کلرید و تبادل کاتیونی

برای بررسی رابطه میان Na و Cl و ارزیابی جهت احتمالی تبادل کاتیونی، از نمودار



شکل ۶- a) رابطه Na و Cl نسبت به خط ۱:۱ و b) رابطه میان شاخص‌های کلروآلکالن CAI-I و CAI-II در نمونه‌های آب گستره‌های معدنی گل گهر (GW)، سرچشمه (SW) و پابدانا (PW).

Figure 6-a) Relationship between Na and Cl relative to the 1:1 line and b) relationship between the chloro-alkaline indices CAI-I and CAI-II in water samples from the Gol-e- Gohar (GW), Sarcheshmeh (SW), and Pabdana (PW) mining areas.

کاتیونی را فراهم کنند؛ از این رو، افزایش نسبی Na و K در بیشتر نمونه‌ها با تبادل یونی در تماس با سنگ‌های دگرسان‌شده سازگار است (Appelo and Postma, 2005). رفتار متفاوت SW4 و SW10 نیز ممکن است بازتاب ناهمگنی سنگ‌شناسی و تفاوت مسیر جریان و مدت تماس آب با پهنه‌های دگرسانی باشد؛ هرچند تعیین علت دقیق آن به اطلاعات تفصیلی مسیر جریان نیاز دارد.

در گستره معدنی پابدانا، نمونه‌های PW1 و PW4 پایین‌تر از خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند و دارای مقادیر مثبت CAI هستند؛ در حالی که ۸ نمونه دیگر افزایش نسبی Na و مقادیر منفی CAI را نشان می‌دهند. بررسی‌های کانی‌شناسی زغال‌سنگ‌های پابدانا، افزون بر کانی‌های کربناته، حضور ایلیت، کائولینیت، موسکویت و فلدسپار را نشان داده است (Moosavirad et al., 2013). کانی‌های رسی می‌توانند جایگاه‌های لازم برای تبادل کاتیونی را فراهم کنند و هوازدهی فلدسپار نیز ممکن است در تامین بخشی از Na نقش داشته باشد. بنابراین، مقادیر منفی CAI در بیشتر نمونه‌ها با تماس آب با واحدهای رسی و زغال‌دار و وقوع واکنش‌های آب-سنگ سازگار است. با این حال، افزایش نسبی Na به‌تنهایی منشأ این یون یا رخداد یک فرایند مشخص را اثبات نمی‌کند و برای تفکیک نقش تبادل کاتیونی و هوازدهی کانی‌های سدیم‌دار، به شواهد تکمیلی نیاز است.

۴-۵- رابطه یون‌های اصلی با کل جامدات محلول

برای بررسی تغییرات غلظت یون‌های اصلی با افزایش کل جامدات محلول (TDS)، نمودارهای دومتغیره برای ۳ گستره معدنی ترسیم شدند (شکل ۷). نتایج نشان

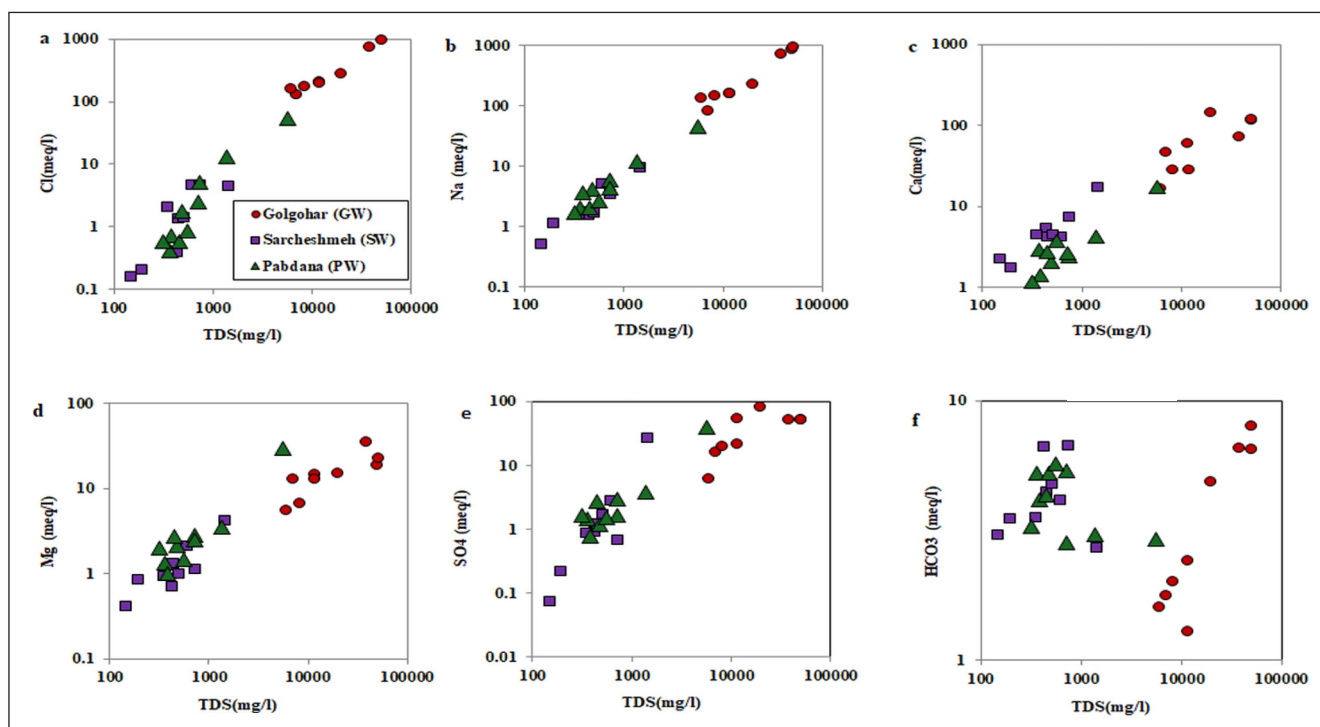
در گستره معدنی گل گهر، تمامی نمونه‌ها پایین‌تر از خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند و هر دو شاخص CAI نیز مقادیر مثبت دارند؛ نمونه GW4 کمترین انحراف را از این خط نشان می‌دهد. این الگو بیانگر بیشتر بودن غلظت معادل Cl نسبت به Na و K و جذب بخشی از Na و K موجود در آب در جایگاه‌های تبدلی است. با توجه به گسترش نهشته‌های آبرفتی کواترنری در این گستره، اجزای رسی موجود در این نهشته‌ها می‌توانند جایگاه‌های مناسبی برای تبادل کاتیونی فراهم کنند (Appelo and Postma, 2005). همچنین، انحلال هالیت در نهشته‌های کفه نمکی، وقوع تبادل کاتیونی و ارتباط هیدرولیکی و هیدروژئوشیمیایی کفه نمکی خیرآباد با بخشی از آب‌های زیرزمینی گودال معدنی شماره ۲ پیش‌تر گزارش شده است (جعفری و همکاران، ۱۴۰۳). بنابراین، الگوی مشاهده‌شده می‌تواند نشان‌دهنده ورود آب کلروبه مرتبط با کفه نمکی و تغییر ترکیب آن بر اثر تبادل کاتیونی در نهشته‌های آبرفتی باشد. با این حال، سهم آب کفه نمکی و شوره‌های ژرف را نمی‌توان تنها با استفاده از این نمودارها از یکدیگر تفکیک کرد.

در گستره معدنی سرچشمه، نمونه‌های SW4 و SW10 پایین‌تر از خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند و دارای مقادیر مثبت CAI هستند؛ در مقابل، ۷ نمونه دیگر بالاتر از این خط قرار دارند و مقادیر منفی CAI را نشان می‌دهند. مقادیر منفی بیانگر بیشتر بودن غلظت معادل Na و K نسبت به Cl و آزادشدن احتمالی این دو یون از جایگاه‌های تبدلی است. سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی سرچشمه به‌طور گسترده تحت‌تأثیر دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک قرار گرفته‌اند (Boomer et al., 2010). کانی‌های رسی حاصل از دگرسانی می‌توانند جایگاه‌های لازم برای تبادل

با رخساره Na-Cl، نشان می‌دهد که افزایش شوری آب‌های گل‌گهر بیشتر با افزایش Na و Cl همراه است. ارتباط گزارش شده میان آب‌های گودال معدنی شماره ۲ و کفه نمکی خیرآباد، احتمال اختلاط با آب شور کفه نمکی و انحلال هالیت موجود در نهشته‌های شور را مطرح می‌کند (جعفری و همکاران، ۱۴۰۳). افزایش غلظت املاح بر اثر تبخیر نیز ممکن است در شکل‌گیری این الگو نقش داشته باشد؛ هرچند نمودار گیبس به‌تنهایی رخداد این فرایند را اثبات نمی‌کند. افزایش نسبی SO_4 در نمونه‌های GW2 و GW5 نیز می‌تواند با انحلال فازهای سولفات یا اکسایش کانی‌های سولفیدی مرتبط باشد، اما داده‌های موجود برای تفکیک سهم این دو فرایند کافی نیست (Appelo and Postma, 2005; Nordstrom, 2011).

می‌دهند که الگوی تغییر یون‌ها و عوامل موثر بر شیمی آب در ۳ گستره یکسان نیست. روابط آماری مشاهده شده تنها بیانگر همراهی متغیرها هستند و به‌تنهایی منشا مشترک یون‌ها یا اثر یک فرایند مشخص را اثبات نمی‌کنند (Hem, 1985; Appelo and Postma, 2005).

در گستره معدنی گل‌گهر، بیشترین ارتباط با TDS مربوط به Na و Cl است و مقادیر ضریب تعیین آن‌ها به ترتیب ۰/۹۵۷ و ۰/۹۴۲ می‌باشد. HCO_3 نیز روند افزایشی مشخصی دارد و ضریب تعیین آن ۰/۸۶۳ می‌باشد؛ باین‌حال، غلظت و سهم آن در ترکیب یونی آب در مقایسه با Na و Cl بسیار کمتر است. مقادیر ضریب تعیین برای Mg، Ca و SO_4 نیز به ترتیب ۰/۶۸۰، ۰/۶۵۷ و ۰/۵۵۶ می‌باشد. این الگو، همراه



شکل ۷- رابطه غلظت یون‌های اصلی (HCO_3 ، Cl، Na، Ca، Mg، SO_4) با کل جامدات محلول (TDS) در نمونه‌های آب گستره‌های معدنی گل‌گهر (GW)، سرچشمه (SW) و پابدانا (PW).

Figure 7. Relationships of the major-ion concentrations (Cl, Na, Ca, Mg, SO_4 , and HCO_3) with total dissolved solids (TDS) in water samples from the Gol-e- Gohar (GW), Sarcheshmeh (SW), and Pabdana (PW) mining areas.

معادل یکدیگر نیستند. نتایج تحلیل نمونه‌های برداشت شده در اردیبهشت ۱۴۰۳ در شکل ۸ ارائه شده است.

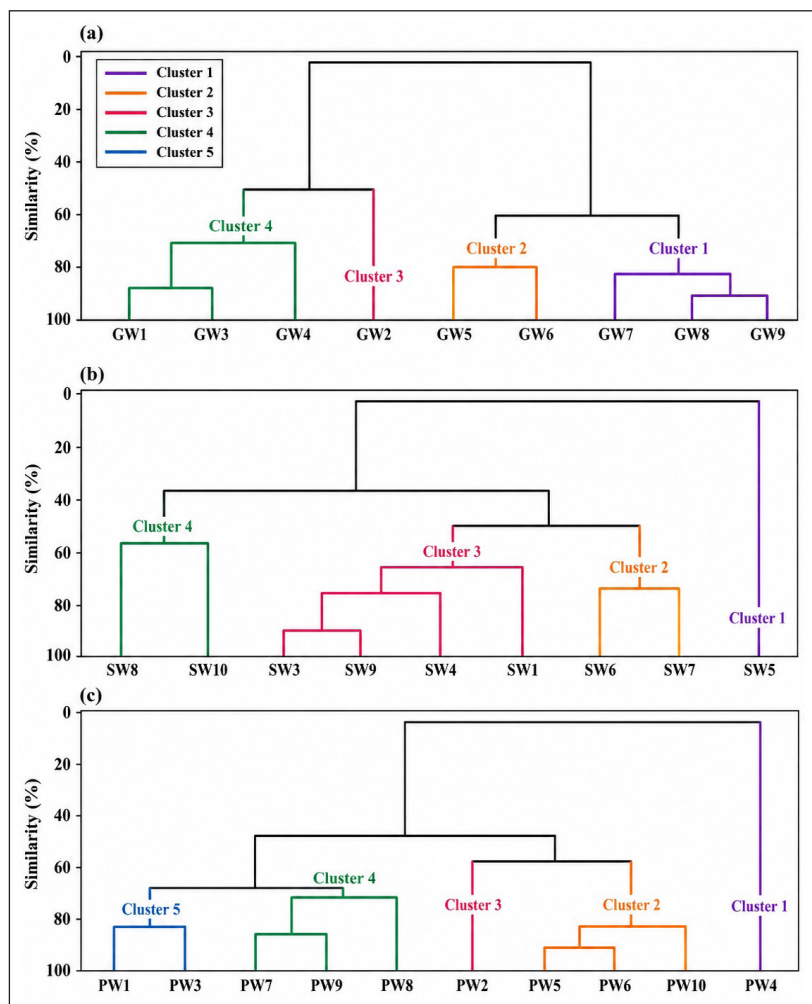
در گستره معدنی گل‌گهر، نمونه‌ها در ۴ خوشه قرار گرفتند. خوشه ۱ شامل GW7، GW8 و GW9 است که در مقایسه با سایر نمونه‌های این گستره، کمترین شوری نسبی را نشان می‌دهند؛ هرچند هدایت الکتریکی آن‌ها همچنان زیاد و بین ۹۱۴۰ تا ۱۶۹۸۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. خوشه ۲ شامل GW5 و GW6 است. باوجود هم‌پوشانی دامنه هدایت الکتریکی این دو نمونه با خوشه ۱، مقادیر بیشتر Ca و SO_4 موجب جدایی آن‌ها شده است. بنابراین، جدایی خوشه‌های ۱ و ۲ تنها تابع مقدار کل املاح محلول نیست و تفاوت ترکیب یونی نمونه‌ها نیز در آن نقش دارد. نمونه GW2 به‌تنهایی خوشه ۳ گل‌گهر را تشکیل می‌دهد. این نمونه با هدایت الکتریکی ۴۰۲۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، TDS برابر با ۱۹۹۴۱ میلی‌گرم بر لیتر و مقادیر زیاد Ca و SO_4 ، از چاه‌های اطراف گودال معدنی متمایز است و از نظر مقدار

۳-۶- تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی

به‌منظور شناسایی الگوهای شباهت در ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب، تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی بر اساس غلظت یون‌های اصلی انجام شد. این روش با بررسی هم‌زمان چند متغیر هیدروشیمیایی، نمونه‌های دارای ترکیب شیمیایی مشابه را در گروه‌های به‌نسبت همگن قرار می‌دهد و ناهمگنی موجود در هر گستره را آشکار می‌کند (Güler et al., 2002; Ayenew et al., 2009; Fabbrocino et al., 2019). داده‌های Na، Mg، Ca، SO_4 ، Cl، HCO_3 و K در هر گستره به‌طور جداگانه با روش Min-Max به‌نچارسازی شدند و سپس فاصله اقلیدسی و روش پیوند Ward برای تشکیل خوشه‌ها به‌کار رفت (Das et al., 2022). تعداد خوشه‌ها بر اساس ساختار شاخه‌ها و جهش‌های اصلی فاصله پیوندی در هر نمودار درختی (دندروگرام) تعیین شد. از آنجا که تحلیل هر گستره به‌صورت جداگانه انجام شده است، شماره خوشه‌ها تنها شناسه گروه‌های همان گستره است و خوشه‌های هم‌شماره در ۳ گستره لزوماً

رخساره Na-Cl و موقعیت این نمونه‌ها در دیواره گودال معدنی، با اثرپذیری احتمالی از منابع آب شور و کفه نمکی خیرآباد سازگار است (Appelo and Postma, 2005؛ جعفری و همکاران، ۱۴۰۳). با این حال، تحلیل خوشه‌ای به‌تنهایی ارتباط هیدرولیکی گودال معدنی با کفه نمکی یا سهم ورود آب شور را اثبات نمی‌کند.

املاح محلول، وضعیت حدواسطی میان این چاه‌ها و نمونه‌های بسیار شور دیواره گودال دارد. خوشه ۴ شامل GW1، GW3، GW4 و بیشترین مقادیر هدایت الکتریکی، TDS، Cl و Na را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که هدایت الکتریکی این گروه بین ۷۸۱۰۰ تا ۱۰۲۷۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر تغییر می‌کند. همراهی مقادیر زیاد Na و Cl با



شکل ۸- نمودارهای درختی حاصل از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی نمونه‌های آب گستره‌های معدنی: (a) گل‌گهر، (b) سرچشمه و (c) پابدانا در اردیبهشت ۱۴۰۳ (رنگ‌ها نشان‌دهنده عضویت نمونه‌ها در خوشه‌های هیدروشیمیایی هستند).

Figure 8. Dendrograms resulting from hierarchical cluster analysis of water samples from the mining areas: a) Gol-e Gohar, b) Sarcheshmeh, and c) Pabdana in May 2024. Colors indicate membership in the hydrochemical clusters.

۲۷۷ تا ۳۵۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، کمترین مقدار املاح محلول را نشان می‌دهد. خوشه ۳ سرچشمه شامل SW1، SW3، SW4، SW9 است و از نظر هدایت الکتریکی، TDS و غلظت یون‌های اصلی در محدوده میانی قرار دارد. خوشه ۴ شامل SW8 و SW10 است که در مقایسه با خوشه‌های ۲ و ۳، مقادیر بیشتری از Na، TDS، Cl دارند. قرارگیری این دو نمونه در مجاورت پهنه‌های دگرسانی فیلیک و آرژیلیک، احتمال تأثیر بیشتر واکنش آب با سنگ‌ها به کانی‌شناسی، مدت تماس و مسیر جریان آب ترکیب شیمیایی آب در این محیط‌ها به کانی‌شناسی، مدت تماس و مسیر جریان آب وابسته است (Appelo and Postma, 2005; Liu et al., 2017). با این حال، هم‌مکانی

در گستره معدنی سرچشمه نیز ۴ خوشه هیدروشیمیایی شناسایی شد. نمونه SW5 به‌تنهایی خوشه ۱ را تشکیل می‌دهد. این نمونه که از زهکش معدن برداشت شده است، بیشترین هدایت الکتریکی، Ca، TDS و SO_4 و کمترین pH را در میان نمونه‌های سرچشمه دارد و دارای رخساره $Ca-SO_4$ است. همراهی مقدار زیاد SO_4 با pH پایین‌تر می‌تواند با اکسایش کانی‌های سولفیدی یا انحلال کانی‌های سولفات مرتبط باشد (Nordstrom, 2011; Liu et al., 2017). با توجه به نبود داده‌های کانی‌شناسی و ایزوتوپی سولفات، سهم هریک از این دو فرایند را نمی‌توان به‌طور قطعی تعیین کرد. خوشه ۲ نیز شامل SW6 و SW7 است و با هدایت الکتریکی بین

منابع ورودی را مشخص نمی‌کند (Güler et al., 2002; Fabbrocino et al., 2019). دست‌یابی به چنین نتایجی مستلزم تلفیق داده‌های هیدروژئوشیمیایی با اطلاعات تراز و جهت جریان آب، ایزوتوپ‌های محیطی و مدل‌های اختلاط یا مدل‌سازی معکوس هیدروژئوشیمیایی است (Liu et al., 2017; Ju et al., 2022).

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، شناخت ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب در گستره‌های معدنی گل‌گهر، سرچشمه و پابدانا و ارزیابی کاربرد این اطلاعات در پی‌جویی و مطالعات ژئوشیمی اکتشافی است. نتایج بررسی ۲۸ نمونه آب نشان داد که ۳ گستره از نظر شوری، رخساره هیدروژئوشیمیایی و فرایندهای موثر بر ترکیب آب تفاوت دارند. دامنه هدایت الکتریکی در گل‌گهر، سرچشمه و پابدانا به ترتیب ۹۱۴۰ تا ۱۰۲۷۰۰، ۲۷۷ تا ۲۹۶۰ و ۶۳۵ تا ۹۷۴۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. در میان نمونه‌های بررسی‌شده، نمونه‌های گل‌گهر بیشترین شوری را دارند؛ منابع آب سرچشمه، به‌جز SW5، عمدتاً کم‌شورتر هستند و در پابدانا، PW4 به‌صورت یک نمونه بسیار شور و متمایز است.

تمامی نمونه‌های گل‌گهر دارای رخساره Na-Cl می‌باشند و نمونه‌های دیواره گودال معدنی شماره ۲ شوری بیشتری از چاه‌های اطراف نشان دادند. همراهی افزایش TDS با Na و Cl، نتایج نمودار گیبس و الگوی خوشه‌بندی با اثرپذیری احتمالی آب‌ها از یک منبع شور مرتبط با کفه نمکی خیرآباد، تبخیر و واکنش آب-سنگ سازگار است؛ با این حال، سهم هریک از این فرایندها با داده‌های موجود قابل محاسبه نیست. در سرچشمه، بیشتر نمونه‌ها دارای رخساره Ca-HCO₃ می‌باشند؛ در حالی که زه‌آب معدنی SW5 با رخساره Ca-SO₄، بیشترین TDS و کمترین pH را دارد. ترکیب این نمونه با اکسایش احتمالی کانی‌های سولفیدی، انحلال فازهای سولفات و واکنش‌های خنثی‌کننده سازگار است، اما سهم این فرایندها بدون شواهد تکمیلی قابل تفکیک نیست. در پابدانا، بیشتر نمونه‌ها دارای رخساره‌های بی‌کربناته می‌باشند و شوری زیاد PW4 با افزایش غلظت املاح بر اثر تبخیر و واکنش آب با دیواره‌ها و رسوبات گودال روباز خمرود سازگار است. شاخص‌های کلروآلکالین نیز نشان دادند که جهت احتمالی تبادل کاتیونی در ۳ گستره یکسان نیست.

تحلیل خوشه‌ای نمونه‌های گل‌گهر، سرچشمه و پابدانا را به ترتیب در چهار، چهار و پنج خوشه قرار داد و نمونه‌های متمایزی مانند GW2، SW5، PW2 و PW4 را مشخص کرد. این تحلیل امکان شناسایی ناهمگنی درون هر گستره، انتخاب نمونه‌های نماینده و تعیین نقاط نیازمند پایش بیشتر را فراهم کرد؛ اما به‌تنهایی منشأ آب یا ارتباط هیدرولیکی منابع را اثبات نمی‌کند. نتایج تلفیقی نشان داد که ترکیب شیمیایی آب در گستره‌های معدنی تنها تحت‌تأثیر نوع ماده معدنی نیست و شرایط زمین‌شناسی، واکنش آب-سنگ، تبادل کاتیونی، زهکشی معدن و تبخیر نیز در شکل‌گیری آن نقش دارند. از این رو، تعیین زمینه هیدروژئوشیمیایی هر گستره پیش از تفسیر ناهنجاری‌های شیمیایی آب، احتمال برداشت نادرست از داده‌های ژئوشیمی اکتشافی را کاهش می‌دهد. با توجه به انجام نمونه‌برداری در یک دوره، نمونه‌برداری فصلی، بررسی ایزوتوپ‌های محیطی، محاسبه شاخص‌های اشباع و اندازه‌گیری تراز و جهت جریان آب برای تأیید منشأ شوری و سهم فرایندهای موثر پیشنهاد می‌شود.

با پهنه‌های دگرسانی به‌تنهایی این فرایند را اثبات نمی‌کند و تأیید آن به بررسی‌های کانی‌شناسی، شاخص‌های اشباع و اطلاعات هیدروژئولوژیکی نیاز دارد.

در گستره معدنی پابدانا، نمونه‌ها در ۵ خوشه قرار گرفتند. نمونه PW4 به‌تنهایی خوشه ۱ را تشکیل می‌دهد. این نمونه از آب تجمع‌یافته در گودال روباز خمرود برداشت شده و با هدایت الکتریکی ۹۷۴۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، TDS برابر با ۲/۵۶۴۹ میلی‌گرم بر لیتر و مقادیر زیاد SO₄، Cl و Na، متمایزترین نمونه این گستره است. تجمع آب در کف گودال، افزایش مدت تماس آب با مواد زمین‌شناسی و افزایش غلظت املاح بر اثر تبخیر می‌تواند در شکل‌گیری ترکیب شیمیایی این نمونه نقش داشته باشند (Appelo and Postma, 2005; Liu et al., 2017). با این حال، تعیین سهم تبخیر به بررسی ایزوتوپ‌های پایدار و تراز آبی گودال نیاز دارد. خوشه ۲ شامل PW6، PW5 و PW10 است و با غلبه HCO₃ و TDS بین ۴۸۳ تا ۷۱۹ میلی‌گرم بر لیتر مشخص می‌شود. شباهت ترکیب این نمونه‌ها می‌تواند بازتاب تماس آن‌ها با واحدهای رسوبی گستره باشد، اما خوشه‌بندی به‌تنهایی عبور مستقیم آب از لایه‌های زغال‌دار یا منشأ سازندی آن‌ها را اثبات نمی‌کند.

نمونه PW2 به‌تنهایی خوشه ۳ پابدانا را تشکیل می‌دهد و جدایی آن، با وجود TDS نسبتاً کم، بیشتر با مقدار بالاتر K همراه است. خوشه ۴ شامل PW7، PW8 و PW9 است و به‌طور کلی کمترین مقادیر TDS را در گستره پابدانا نشان می‌دهد. خوشه ۵ نیز شامل PW1 و PW3 است که در مقایسه با خوشه‌های ۲ و ۴، مقادیر بیشتری از Na، Cl و TDS دارند و گرایش آن‌ها به رخساره Na-Cl در نمودار پایپر نیز مشاهده می‌شود. تغییر ترکیب از آب‌های بی‌کربناته به آب‌های غنی‌تر از Na و Cl می‌تواند با افزایش واکنش آب-سنگ، انحلال مواد نمکی یا افزایش غلظت املاح مرتبط باشد. با این حال، تفکیک سهم این فرایندها به شواهد تکمیلی نیاز دارد (Appelo and Postma, 2005).

مقایسه ۳ گستره نشان می‌دهد که منابع آب آن‌ها الگوی هیدروژئوشیمیایی یکسانی ندارند. گل‌گهر با شوری زیاد و رخساره Na-Cl، سرچشمه با آب‌های عمدتاً دارای رخساره Ca-HCO₃ و حضور نمونه متمایز و سولفات‌دار SW5 و پابدانا با آب‌های عمدتاً بی‌کربناته و حضور نمونه بسیار شور PW4 مشخص می‌شوند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهند که ترکیب شیمیایی آب در گستره‌های معدنی تنها تابع نوع ماده معدنی یا فعالیت معدن‌کاری نیست و شرایط زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، نوع منبع آب، موقعیت نمونه‌برداری و فرایندهای محلی نیز در آن نقش دارند (Kusimi and Kusimi, 2012; Liu et al., 2017; Qin et al., 2019).

کاربرد تحلیل خوشه‌ای در این پژوهش، مشخص کردن دامنه تغییرات درون هر گستره، طبقه‌بندی نمونه‌های مشابه و شناسایی نمونه‌های متمایز است. این طبقه‌بندی می‌تواند برای طراحی پایش‌های بعدی به کار رود؛ به‌طوری‌که از خوشه‌های چندعضوی، نمونه‌های نماینده انتخاب شوند و نمونه‌های منفرد مانند GW5، SW2، PW2 و PW4 به‌صورت جداگانه بررسی شوند. همچنین، نمونه‌های بسیار شور دیواره گودال معدنی گل‌گهر، زهکش معدنی SW5 و آب تجمع‌یافته PW4 به بررسی دقیق‌تر و پایش دوره‌ای نیاز دارند. با این حال، پایداری این خوشه‌ها در طول زمان تنها با یک مرحله نمونه‌برداری قابل ارزیابی نیست و به نمونه‌برداری فصلی نیاز دارد. تحلیل خوشه‌ای نیز به‌تنهایی منشأ قطعی آب، ارتباط هیدرولیکی یا سهم

کتابنگاری

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۹، زمین‌شناسی ایران. چاپ سوم، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶ صفحه.
- جان‌جانه، ب. و ناصری، ح.ر.، ۱۳۹۳، بررسی هیدروژئوشیمی منابع آب دشت قطارینه. همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، شیراز. <https://civilica.com/doc/373863>.
- جعفری، ف.، ناصری، ح.ر.، علیجانی، ف. و مکنونی گیلانی، س.، ۱۴۰۳، تعیین منشأ شوری آب زیرزمینی معدن شماره ۲ گل‌گهر سیرجان با استفاده از نقشه خودسازمان‌ده و تحلیل خوشه‌ای. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴ (۴)، ۳۷-۵۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.452583.2140>.
- سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۴۰۳. اطلس راه‌های ایران، مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰، مؤسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی نوین، تهران، ۱۰۶ صفحه.
- حسینی، ا.، ۱۳۸۳، زغال‌سنگ از تشکیل تا مصرف؛ زمین‌شناسی، اکتشاف، استخراج، فرآوری و کاربرد. دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ۲۶۷ صفحه.
- معین‌السادات، ح. و رضوی ارمغانی، ب.، ۱۳۷۲، زغال‌سنگ. سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران، ۲۱۲ صفحه.
- ناصری، ح.ر.، علیجانی، ف. و محرابی‌نژاد، ع.، ۱۳۹۳، هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی در معدن زغال‌سنگ زیرآب. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۴ (۱)، ۳۷-۴۸. https://aag.scu.ac.ir/article_10882.html.
- ولی‌نیا، ح.، بیات، ن. و ناصری، ح.ر.، ۱۳۹۹، ارزیابی تأثیر فعالیت‌های معدن‌کاری معدن مس سرچشمه بر منابع آب و خاک نواحی پایین‌دست. سی‌ونهمین کنگره ملی و چهارمین کنگره بین‌المللی علوم زمین، تهران. <https://civilica.com/doc/1202370>.

References

- Aghaloo, K., and Sharifi, A., 2023. A GIS-based agroecological model for sustainable agricultural production in arid and semi-arid areas: The case of Kerman Province, Iran. *Current Research in Environmental Sustainability*, 6, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2023.100230>
- Aghanabati, A., 2010. *Geology of Iran*. 3rd ed., Geological Survey of Iran, Tehran, 586 p. (In Persian).
- Alibabaie, N., Esmacily, D., Peters, S.T.M., Horn, I., Gerdes, A., Nirooamand, S., Jian, W., Mansouri, T., Tudeschi, H., and Lehmann, B., 2020. Evolution of the Kiruna-type Gol-e-Gohar iron ore district, Sanandaj-Sirjan zone, Iran. *Ore Geology Reviews*, 127, 103787. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103787>.
- APHA, AWWA, and WEF, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd ed., edited by Baird, R.B., Eaton, A.D., and Rice, E.W., American Public Health Association, Washington, DC, 1796 p.
- Appelo, C.A.J., and Postma, D., 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, 672 p. Publisher page.
- Ayenew, T., Fikre, S., Wisotzky, F., Demlie, M., and Wöhnlich, S., 2009. Hierarchical cluster analysis of hydrochemical data as a tool for assessing the evolution and dynamics of groundwater across the Ethiopian Rift. *International Journal of Physical Sciences*, 4(2), 76–90. Article page.
- Belkhir, L., Boudoukha, A., and Mouni, L., 2011. A multivariate statistical analysis of groundwater chemistry data. *International Journal of Environmental Research*, 5(2), 537–544. <https://doi.org/10.22059/IJER.2011.338>.
- Bokar, H., Traoré, A.Z., Mariko, A., Diallo, T., Traoré, A., Sy, A., Soumaré, O., Dolo, A., Bamba, F., Sacko, M., and Touré, O., 2020. Geogenic influence and impact of mining activities on water, soil and plants in surrounding areas of Morila Mine, Mali. *Journal of Geochemical Exploration*, 209, 106429. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106429>.
- Boomeri, M., Nakashima, K., and Lentz, D.R., 2010. The Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: A mineralogical analysis of the igneous rocks and alteration zones including halogen element systematics related to Cu mineralization processes. *Ore Geology Reviews*, 38(4), 367–381. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.09.001>.
- Clark, I.D., 2015. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press, Boca Raton, 438 p. <https://doi.org/10.1201/b18347>.
- Das, C.R., Das, S., and Panda, S., 2022. Groundwater quality monitoring by correlation, regression and hierarchical clustering analyses using WQI and PAST tools. *Groundwater for Sustainable Development*, 16, 100708. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100708>.
- Doulati Ardejani, F., Karami, G.H., Bani Assadi, A., and Atash Dehghan, R., 2008. Hydrogeochemical investigations of the Shour River and groundwater affected by acid mine drainage in Sarcheshmeh porphyry copper mine. In: Rapantova, N., and Hrkál, Z. (eds.), *Mine Water and the Environment*, 10th International Mine Water Association Congress, Karlovy Vary, Czech Republic, pp. 235–238. IMWA proceedings.
- Eary, L.E., 1999. Geochemical and equilibrium trends in mine pit lakes. *Applied Geochemistry*, 14(8), 963–987. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(99\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(99)00049-9).
- Fabbrocino, S., Rainieri, C., Paduano, P., and Ricciardi, A., 2019. Cluster analysis for groundwater classification in multi-aquifer systems based on a novel correlation index. *Journal of Geochemical Exploration*, 204, 90–111. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.05.006>.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088–1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>.
- Güler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E., and Turner, A.K., 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10(4), 455–474. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6>.
- Hem, J.D., 1985. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. 3rd ed., U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263 p. USGS publication.

- Hosseini, A., 2004. *Coal from Formation to Consumption: Geology, Exploration, Extraction, Processing and Application*. Imam Khomeini International University, Qazvin, 267 p. (In Persian).
- Huckriede, R., Kürsten, M., and Venzlaff, H., 1962. Zur Geologie des Gebietes zwischen Kerman und Sagand (Iran). Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, 51, 1–197. WorldCat.
- ISO, 1998. ISO 14911:1998, Water quality—Determination of dissolved Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} and Ba^{2+} using ion chromatography—Method for water and waste water. International Organization for Standardization, Geneva, 18 p. ISO 14911:1998.
- ISO, 2007. ISO 10304-1:2007, Water quality—Determination of dissolved anions by liquid chromatography of ions—Part 1: Determination of bromide, chloride, fluoride, nitrate, nitrite, phosphate and sulfate. International Organization for Standardization, Geneva, 15 p. ISO 10304-1:2007.
- Jafari, F., Nassery, H.R., Alijani, F., and 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), 37–54. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.452583.2140>. (In Persian).
- Jahanshahi, R., and Zare, M., 2017. Delineating the origin of groundwater in the Golgohar mine area of Iran using stable isotopes of ^2H and ^{18}O and hydrochemistry. *Mine Water and the Environment*, 36(4), 550–563. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0444-6>
- Janjaneh, B., and Nassery, H.R., 2014. *Hydrogeochemical investigation of water resources in the Qatrabaneh Plain*. National Conference on Geology and Resource Exploration, Shiraz. <https://civilica.com/doc/373863>. (In Persian).
- Ju, Q., Hu, Y., Liu, Q., Liu, Y., and Hu, T., 2022. Key hydrological process of a multiple aquifer flow system in the mining area of Huaibei Plain, Eastern China. *Applied Geochemistry*, 140, 105270. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105270>.
- Kidder, J.A., Sullivan, K., Leybourne, M.I., Voinot, A., Layton-Matthews, D., Stoltze, A., and Bowell, R.J., 2022. Hydrogeochemical mineral exploration in deeply weathered terrains: An example from Mumbwa, Zambia. *Science of the Total Environment*, 810, 151215. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151215>.
- Kim, J.H., Kim, R.H., Lee, J.H., Cheong, T.J., Yum, B.W., and Chang, H.W., 2005. Multivariate statistical analysis to identify the major factors governing groundwater quality in the coastal area of Kimje, South Korea. *Hydrological Processes*, 19(6), 1261–1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.5565>.
- Kusimi, J.M., and Kusimi, B.A., 2012. The hydrochemistry of water resources in selected mining communities in Tarkwa. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.003>.
- Leybourne, M.I., and Cameron, E.M., 2010. Groundwater in geochemical exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(2), 99–118. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-222>.
- Liu, F., Song, X., Yang, L., Zhang, Y., Han, D., Ma, Y., and Bu, H., 2015. Identifying the origin and geochemical evolution of groundwater using hydrochemistry and stable isotopes in the Subei Lake basin, Ordos energy base, Northwestern China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 551–565. <https://doi.org/10.5194/hess-19-551-2015>.
- Liu, P., Hoth, N., Drebenstedt, C., Sun, Y., and Xu, Z., 2017. Hydro-geochemical paths of multi-layer groundwater system in coal mining regions—Using multivariate statistics and geochemical modeling approaches. *Science of the Total Environment*, 601–602, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.146>.
- Mahdani, M.A., 1996. Geological Map of Ravar, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Marandi, A., and Shand, P., 2018. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram. *Applied Geochemistry*, 97, 209–212. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.07.009>
- Mehrabi, A., Derakhshani, R., Nilfouroushan, F., Rahnamarad, J., and Azarafza, M., 2023. Spatiotemporal subsidence over Pabdana coal mine, Kerman Province, central Iran using time-series of Sentinel-1 remote sensing imagery. *Episodes*, 46(1), 19–33. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2022/022009>.
- Moein Al-Sadat, H., and Razavi Armaghani, B., 1993. *Coal*. Geological Survey of Iran, Tehran, 212 p. (In Persian).
- Moosavirad, S.M., Rasouli, J., Janardhana, M.R., Moghadam, M.R., and Shankara, M., 2013. Petrographic, mineralogy, and geochemistry of coals of Pabedana, Kerman Province, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(10), 3623–3634. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0618-2>.
- Nassery, H.R., Alijani, F., and Mehrabi Nejad, A., 2014. *Hydrogeochemistry of groundwater in the Zirab coal mine*. *Advanced Applied Geology*, 4(1), 37–48. Article page. (In Persian).
- National Cartographic Center, 2024. *Atlas of Iran's Roads*. Gitashenasi Novin Geographic and Cartographic Institute. (In Persian).
- Nordstrom, D.K., 2011. Mine waters: Acidic to circumneutral. *Elements*, 7(6), 393–398. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.393>
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6), 914–928. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>.

- Qin, W., Han, D., Song, X., and Engesgaard, P., 2019. Effects of an abandoned Pb–Zn mine on a karstic groundwater reservoir. *Journal of Geochemical Exploration*, 200, 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.09.007>.
- Sabzehei, M., Eshraghi, S.A., Roshan Ravan, J., and Seraj, M., 1997. Geological Map and Report of Gol-Gohar, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Sahraei Parizi, H., and Samani, N., 2013. Geochemical evolution and quality assessment of water resources in the Sarcheshmeh copper mine area, Iran, using multivariate statistical techniques. *Environmental Earth Sciences*, 69(5), 1699–1718. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2005-4>.
- Schoeller, H., 1965. Qualitative evaluation of groundwater resources. In: *Methods and Techniques of Groundwater Investigations and Development*, Water Resources Series No. 33, UNESCO, Paris, pp. 54–83.
- Shahabpour, J., 1982. Aspects of Alteration and Mineralization at the Sar-Cheshmeh Copper–Molybdenum Deposit, Kerman, Iran. Ph.D. thesis, University of Leeds, UK, 342 p. EThOS record.
- Soheili, M., Hosseini, Z., Ghaemi, J., Mohebbi, A.R., and Ghomashi, A., 1995. Geological Map of Sirjan, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Valeh, N., Alavi Tehrani, N., Sabzehei, M., and Majidi, J., 1985. *Geological Map of Neyriz, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran.*
- Vali Nia, H., Baiat, N., and Nassery, H.R., 2020. *Assessment of the impacts of mining activities at the Sarcheshmeh copper mine on water and soil resources in downstream areas. 39th National and 4th International Geosciences Congress, Tehran. https://civilica.com/doc/1202370 (In Persian).*
- Zhou, M., Li, X., Zhang, M., Liu, B., Zhang, Y., Gao, Y., Ullah, H., Peng, L., He, A., and Yu, H., 2020. Water quality in a worldwide coal mining city: A scenario in water chemistry and health risks exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 213, 106513. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106513>
- Zohrebakhsh, A., and Vahdati Daneshmand, F., 1992. Geological Map of Rafsanjan, scale 1:250,000. Geological Survey of Iran, Tehran.