



Hydrogeochemistry and quality of water resources in the Tahroud Region of Bam, east of Kerman Province

Hadis Shahiki¹ | Mehdi Khorasanipour²

1. Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: hadissheheiki@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: khorasani@uk.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	<p>The objective of this study is to investigate the quality of water resources in Tahroud region in the northwest of Bam city, Kerman province through hydrogeochemical studies. For this purpose, 13 water samples, including 5 samples from the agricultural wells, 4 samples of Ghanats, 3 samples from springs and 1 sample of Tahroud river were sampled and analyzed in the laboratory using Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method. Based on the hydrogeochemical analysis, the water resources of the studied area have dominant Na-Cl facies and are classified as saline waters. The average concentration of EC (6230 $\mu\text{S}/\text{cm}$), TDS (4050 mg/L) as well as of Cl^- (1391 mg/L), Na^+ (9031 mg/L) and SO_4^{2-} (771 mg/L) in the investigated water samples were remarkably higher than the normal or recommended values. The highest amount of these soluble ions were observed in the water samples collected from the playa section of the catchment basin, which was mainly covered by the Quaternary fine-grained deposits. In addition to the hot and dry climate and the high evaporation rate, the existence of Neogene formations containing gypsum and sodium salt under these sediments is another important factor that increase the solutes in underground water sources in this area. Among the investigated potentially toxic elements, the concentration of arsenic with natural origin and higher than the permissible limit of drinking water was observed in some water samples. The evaluation of the water quality of the region using the Schuler diagram also showed that these water sources have an unfavorable to unusable quality for drinking and even for agriculture in some cases.</p>
Article history: Received 06 July 2022 Received in revised form 02 Mey 2023 Accepted 10 May 2023 Published online 10 March 2024	
Keywords: <i>Arsenic,</i> <i>Groundwater,</i> <i>Heavy metals,</i> <i>Hydrogeochemistray,</i> <i>Tahroud region-Abaregh-</i> <i>Bam.</i>	

Cite this article: Shahiki, H., & Khorasanipour, M. (2024). Hydrogeochemistry and quality of water resources in the Tahroud Region of Bam, east of Kerman Province. *Journal of Natural Environment*, 76 (4), 731-746. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.345360.2451>





هیدروژئوشیمی و کیفیت منابع آب منطقه تهرود، بم، شرق استان کرمان

حدیث شهیکی^۱ | مهدی خراسانی پور^۲✉

۱. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: hadissheheiki@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: khorasani@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف از انجام این پژوهش، بررسی کیفیت منابع آب تهرود در شمال غرب شهرستان بم، استان کرمان از طریق مطالعات هیدروژئوشیمیایی می‌باشد. بدین منظور ۱۳ نمونه آب شامل ۵ نمونه از چاه‌های آب کشاورزی، ۴ نمونه از قنات‌ها، ۴ نمونه از چشمه‌ها و ۱ نمونه از رودخانه تهرود نمونه‌برداری و در آزمایشگاه به روش آنالیز پلاسمای جفت شده القایی آنالیز شدند. براساس تحلیل‌های هیدروژئوشیمیایی صورت گرفته منابع آب منطقه مورد مطالعه دارای رخساره غالب Na-Cl و در گروه آب‌های شور قرار می‌گیرند. مقدار غلظت متوسط پارامترهای هدایت الکتریکی ($6230 \mu\text{S/cm}$) و کل جامدات محلول (4050 mg/L) به همراه مقدار غلظت متوسط یون‌های Cl^- (1391 mg/L)، Na^+ (9031 mg/L) و SO_4^{2-} (771 mg/L) در نمونه‌های آب منطقه فراتر از مقادیر عادی و توصیه شده می‌باشد. بیشترین میزان این املاح در نمونه‌های آب واقع در پلایای حوضه آبریز مشاهده گردید که به‌طور عمده از رسوبات دانه‌ریز دوران چهارم پوشیده شده است. علاوه بر آب و هوای گرم و خشک و تبخیر زیاد، وجود سازندهای نئوژن دارای گچ و نمک طعام در زیر این رسوبات نیز عامل مهم دیگری در افزایش املاح در منابع آب زیرزمینی محسوب می‌گردد. در بین عناصر بالقوه سمی بررسی شده، غلظت آرسنیک با منشاء طبیعی و بالاتر از حد مجاز آب آشامیدنی در برخی از نمونه‌های آب مشاهده گردید. ارزیابی کیفیت آب‌های منطقه با استفاده از نمودار شولر نیز نشان داد که این منابع آب دارای کیفیت نامطلوب تا غیر قابل استفاده برای شرب و حتی در برخی موارد برای کشاورزی می‌باشند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰	
کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، آرسنیک، فلزات سنگین، منطقه تهرود-ابارق-بم، هیدروژئوشیمی.	

استناد: شهیکی، حدیث؛ و خراسانی پور، مهدی (۱۴۰۲). هیدروژئوشیمی و کیفیت منابع آب منطقه تهرود، بم، شرق استان کرمان. محیط زیست طبیعی، ۷۶ (۴)،

۷۴۶-۷۳۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.345360.2451>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از منابع مهم تأمین آب شیرین برای میلیون‌ها نفر در جهان هستند و آلوده شدن آن‌ها تأثیرات عمده‌ای بر سلامت انسان‌ها، فعالیت صنایع، کشاورزی و محیط‌زیست دارد (Hassanzadeh, 2011). این منابع آب همواره دارای ترکیباتی از گازها و مواد جامد محلول هستند. کیفیت آب‌های زیرزمینی براساس تشکیل‌دهنده‌های شیمیایی، زیستی (بیولوژیک)، محتوای رسوبی و درجه حرارت آن تعیین می‌گردد (Hounslow, 1995). این کیفیت نتیجه کلیه فرآیندها و واکنش‌هایی است که از زمان تراکم در اتمسفر تا زمان تخلیه شدن از یک چاه یا چشمه روی آن عمل می‌کنند و تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی و انسانی قرار دارند. همچنین ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی می‌تواند آشکارکننده منشأ و تاریخ مواد زیرزمینی که آب در تماس با آن‌ها بوده است و درجه حرارت واقع در عمق باشد (Bouwer, 1978). عوامل متعدد دیگری نظیر زمین‌شناسی (Hem, 1989) و تأثیر سازندها (Freeze and Cherry, 1979)، فرآیندهایی مانند انحلال، هیدرولیز (Hydrolysis)، رسوب‌گذاری، جذب (Adsorption)، تعویض یونی (Ion exchange)، اکسیداسیون و احیا و فعالیت‌های بیولوژیکی و اختلاط آب‌ها (Hounslow, 1995)، نزولات جوی (Davis and De Wiest, 1966)، آب و هوا و موقعیت جغرافیایی (Hem, 1989)، نیم‌رخ خاک و پوشش گیاهی (Bouwer, 1978) و عوامل شوری نیز بر کیفیت آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارند. آگاهی از کیفیت منابع آب یکی از نیازمندی‌های مهم در برنامه‌ریزی توسعه منابع آب، حفاظت و کنترل آن‌ها می‌باشد (Vengosh, 2014).

به‌طور کلی، عوامل مؤثر بر کیفیت منابع آب زیرزمینی شامل عوامل طبیعی (واکنش آب با سنگ، کیفیت آب تغذیه‌ای و سرعت جریان آب زیرزمینی) و عوامل با منشأ انسانی (فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، تخلیه فاضلاب‌های خانگی، شهرسازی، معدنکاری و برداشت‌های بی‌رویه) می‌باشند (Chan, 2001). کیفیت آب زیرزمینی به‌دلیل تغییر در شرایط مختلف از جمله شرایط آب و هوایی، مدت زمان ماندگاری آب در آبخوان، جنس سازندهای زمین‌شناسی، مسیر و تغذیه آب زیرزمینی توسط آب سطحی تغییر می‌کند (Jalali and Asghari Moghaddam, 2013). در این بین ماهیت، ژئوشیمیایی سازندهای موجود در مسیر حرکت آب تأثیر به‌سزایی در تیپ و رخساره آب دارد (Mishra et al., 2005).

علاوه بر غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی، میزان و نوع عناصر کمیاب و بالقوه سمی موجود در آب نیز در تعیین کیفیت آن بسیار مؤثر است. از این نظر عناصر کمیاب هم از نظر منشأ و هم رفتار هیدروژئوشیمیایی با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند. برای مثال رفتار هیدروژئوشیمیایی آرسنیک به‌طور قابل توجهی با دیگر فلزات بالقوه سمی متفاوت است. این عنصر بر خلاف بسیاری از عناصر دیگر مانند Cu, Zn, Pb و Cd که در pHهای خنثی و قلیایی نامتحرک می‌شوند می‌تواند در محدوده pH آب‌های طبیعی (۵/۶-۸/۵) و در دو وضعیت اکسیدی و احیایی نسبتاً متحرک باشد (Smedley and Kinniburgh, 2005).

امروزه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل کمبود منابع آبی با کیفیت مناسب، ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی اهمیت شایانی دارد. استان کرمان به عنوان بهشت معادن ایران شناخته شده است. رخدادهای کانه‌زایی‌های فراوانی از معادن مس، سرب، روی، آهن و امثال آن این استان را در بین سایر استانهای کشور منحصر به فرد نموده است. در کنار ارزش اقتصادی معادن، وجود آنومالی‌های زمین‌شناسی طبیعی و آلودگی‌های محیط‌زیستی احتمالی ناشی از معدنکاری و فرآوری کانسنگ‌های معدنی سبب ایجاد حساسیت‌های محیط‌زیستی فراوان؛ به‌ویژه در خصوص منابع آب زیرزمینی واقع در مجاور مناطق کانه‌زایی این استان شده است. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد وجود آنومالی‌های زمین‌شناسی طبیعی به‌عنوان بخشی از چرخه محیط‌زیستی عناصر در طبیعت سبب آلودگی برخی منابع آب زیرزمینی در استان کرمان شده است (Abbasnejad et al., 2013; Khorasanipour and Esmaeilzadeh, 2016). منطقه تهران که در نزدیکی بخش ابارق شهرستان بم استان کرمان در بین مجموعه‌های کانه‌زایی مس (عمدتاً نوار آتشفشانی دهج ساردوئیه) و سرب و روی (منطقه کانه‌زایی خان خاتون) واقع شده است. مطالعات صورت گرفته در مناطق مجاور این منطقه به‌ویژه در محدوده شهر راین حکایت از وجود آلودگی‌های طبیعی؛ به‌ویژه آرسنیک در منابع آب زیرزمینی دارد (Pazand and Javanshir, 2013). هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی هیدروژئوشیمی و کیفیت منابع آب منطقه تهران شهرستان بم در استان کرمان و شناسایی عوامل مؤثر بر افت کیفیت منابع آب در این منطقه می‌باشد.

روش‌شناسی پژوهش

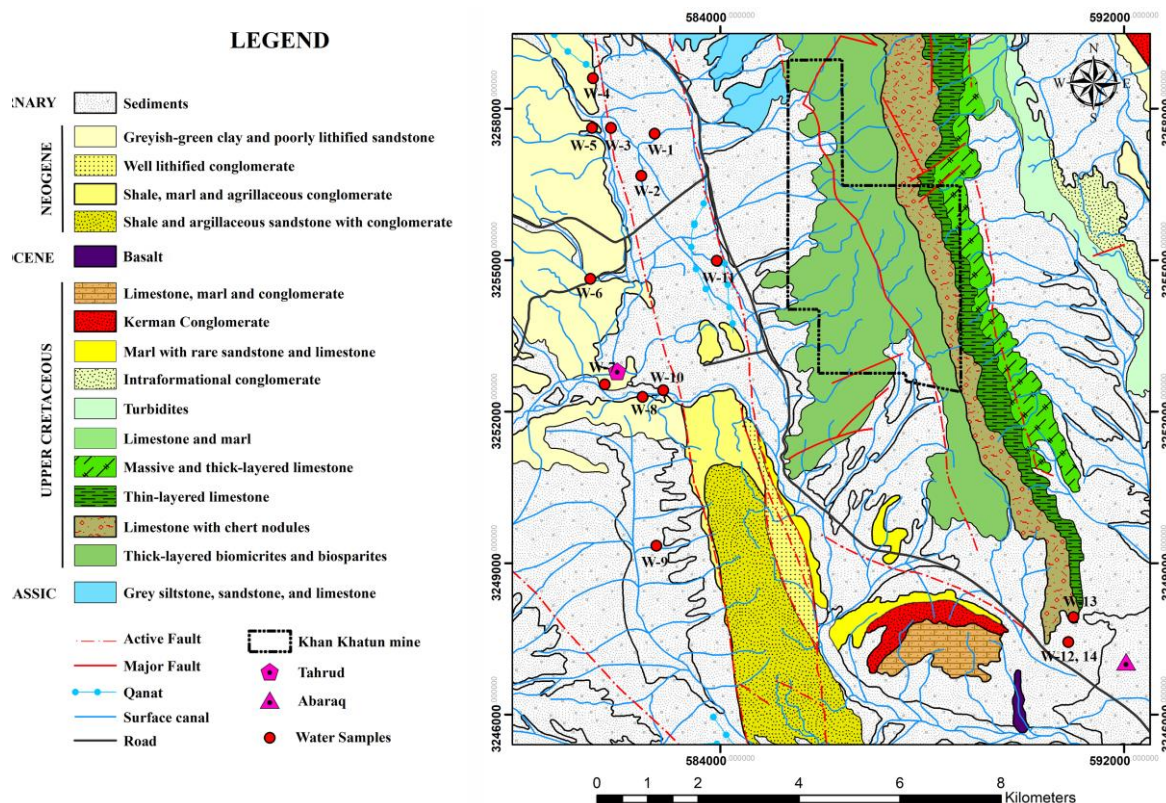
منطقه مورد مطالعه در ۵۹ کیلومتری شمال غرب شهرستان بهم، در محدوده نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خانه خاتون بین طول‌های جغرافیایی ۴۹° تا ۵۷°، ۵۷° شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۰° تا ۲۹°، ۲۷° شمالی واقع شده است. مهم‌ترین رودخانه جاری در این منطقه، رودخانه تهرود است که از ارتفاعات هزار و هنزا در شمال غرب شهرستان بهم سرچشمه می‌گیرد و به طرف جنوب شرق چند مسیل و رودخانه فصلی به آن ملحق شده و از شمال بهم و حدود ۵ کیلومتری شمال بروات عبور کرده و به طرف شمال شرق جریان می‌یابد. منابع تغذیه آب این رودخانه برف، باران و چشمه‌سارهای نواحی کوهستانی بوده و در نهایت وارد چاله‌های جنوبی کویر لوت می‌شود. از نظر ژئومورفولوژی، این محدوده در گودی حوضه آبریز و در یک پلایای کوچک واقع شده است. محیط‌های پلایایی، چاله‌های داخلی مناطق خشکی هستند که جریان‌های آب در نهایت املاح و نمک‌ها را به آن‌ها منتقل می‌کنند. پلایاها عموماً به وسیله دو عامل رسوب و آب مشخص می‌گردند و از نظر نوع نهشته از رسوبات آواری (رسوبات دانه‌ریز سیلتی-رسی) و غیر آواری (رسوبات تخییری) تشکیل شده‌اند (Zamani Farahani, 2015).

از نظر زمین‌شناختی، در منطقه مورد مطالعه ماسه‌سنگ‌ها، آهک‌ها و سیلتستون‌های ژوراسیک، کمپلکس ضخیمی از سنگ‌های آهکی (سنومانین-تورنین) شامل بایومیکریت‌های خاکستری و بایواسپارایت، میکریت تیره، لایه‌های انفاقی از چرت قرمز و رسوبات مارنی-ماسه‌ای مربوط به کرتاسه بالایی، لایه‌های کنگلومرا با دانه‌های گرد شده و جورشدگی خوب (کرتاسه فوقانی-پالئوژن)، بازالت‌های ائوسن بالایی، رسوبات نئوژن به صورت توالی‌هایی با ویژگی‌های رسوب‌شناسی متفاوت شامل شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های آرژیلیتی و لایه‌های کنگلومرای سیمانی شده که حاوی لایه‌های ژئوپیس و مارن است و در کیفیت آب منطقه نقش مهمی دارد و همچنین رسوبات آبرفتی کواترنری شامل پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و جدید، رسوبات رودخانه‌ای و پهنه‌های رسی رخنمون دارند. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه تهرود را نشان می‌دهد (Dimitrijevic et al., 1973).

در این پژوهش، به منظور بررسی هیدروژئوشیمی و کیفیت منابع آب منطقه تهرود ابتدا از طریق بازدیدهای میدانی و همچنین مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه، مسیر نمونه‌برداری و نقاط مورد نظر جهت نمونه‌برداری تعیین و بر روی نقشه زمین‌شناسی مشخص گردید. سپس تعداد ۱۴ نمونه آب شامل ۱۳ ایستگاه و یک نمونه تکراری (۵ نمونه مربوط به چاه‌های آب کشاورزی، ۴ نمونه مربوط به قنات‌ها، ۴ نمونه مربوط به چشمه‌ها و یک نمونه مربوط به رودخانه تهرود)، از منابع آبی نمونه‌برداری شد. نمونه‌های آب با استفاده از بطری‌های پلی‌اتیلن که قبل از نمونه‌برداری با آب مورد نمونه‌برداری شسته شده بودند، برداشته شدند و شماره هر نمونه بر روی بطری‌ها ثبت شد. موقعیت جغرافیایی تمام نقاط نمونه‌برداری توسط دستگاه GPS ثبت و یادداشت گردید. در هر ایستگاه پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب شامل pH و هدایت الکتریکی (EC) همزمان با نمونه‌برداری اندازه‌گیری شدند.

در هر ایستگاه نمونه‌برداری آب دو نمونه برای اندازه‌گیری کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی به صورت جداگانه برداشت شدند. جهت اندازه‌گیری غلظت کاتیون‌ها نمونه‌های آب در هر ایستگاه ابتدا با استفاده از کاغذ صافی ۰/۴۵ میکرون استاندارد فیلتر شدند، pH آن‌ها با استفاده از اسید نیتریک خالص (۶۵ درصد مرک) به کمتر از ۲ رسانده شد و برای تجزیه به روش ICP-MS (دستگاه ICP-MS ساخت کشور آمریکا، مدل: Agilent Series Hp 4500) برای اندازه‌گیری ۵۴ عنصر به آزمایشگاه زرآما تهران ارسال شد. اسیدی کردن نمونه‌ها به منظور تثبیت آن‌ها، جلوگیری از جذب عناصر بر روی ظرف و جلوگیری از انعقاد و لخته‌سازی مواد کلوئیدی می‌باشد. نمونه‌های آنیونی نیز بدون اسیدی کردن برای اندازه‌گیری غلظت شاخص‌های TDS، Cl⁻، HCO₃⁻، CO₃²⁻، SO₄²⁻، TSS، نیترات و نیتريت در کمترین زمان ممکن در آزمایشگاه مولکول کرمان آنالیز شدند. در این مطالعه اندازه‌گیری TDS براساس روش استاندارد 2540C، Cl به روش استاندارد 4500Cl-B، SO₄ به روش استاندارد 4500SO₄-B، TSS به روش استاندارد 2540D، نیترات و نیتريت به روش استاندارد 4500-B و یونهای کربنات و بی‌کربنات به روش تیتراسیون اسید و باز اندازه‌گیری شدند.

در این پژوهش، تضمین و کنترل کیفیت نتایج (QA/QC) از طریق شاخص‌های صحت و دقت مورد ارزیابی قرار گرفت. صحت نتایج از طریق آنالیز نمونه‌های مرجع استاندارد در آزمایشگاه‌های موردنظر و دقت نتایج از طریق تکرار نمونه مشابه، ارزیابی شد.



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه تهرود اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ خانۀ خاتون (Dimitrijevic *et al.*, 1973) به همراه موقعیت ایستگاه‌های نمونه برداری از آب

در نهایت دقت مقادیر گزارش شده با استفاده از شاخص انحراف معیار نسبی (Relative Standard Deviation, RSD) به صورت درصد محاسبه شد (Zhang, 2007). این شاخص بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود که در آن δ : انحراف معیار داده‌ها، \bar{X} : میانگین دو داده تکرار شده است.

رابطه ۱

$$RSD = (\delta / \bar{X}) * 100$$

بر اساس نتایج حاصل از نمونه تکرار شده، دقت نتایج به دست آمده در مورد اغلب متغیرهای مورد نظر بیش از ۹۰ درصد ($RSD = 10\% \pm$) برآورد گردید. در این پژوهش همچنین میزان غنی‌شدگی عناصر و یا ترکیبات اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آب نیز از طریق مقایسه با مقادیر استاندارد و با استفاده از شاخص غنی‌شدگی و یا کاهیدگی (Enrichment/Depletion Factor) مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص بر اساس رابطه ۲ محاسبه گردید (Khorasanipour and Jafari, 2018).

رابطه ۲

$$EF = \frac{M}{S}$$

در رابطه فوق EF: شاخص غنی‌شدگی (Enrichment/Depletion Factor)، صورت کسر M: غلظت در نمونه مورد نظر و S: مقدار استاندارد تعریف شده می‌باشد.

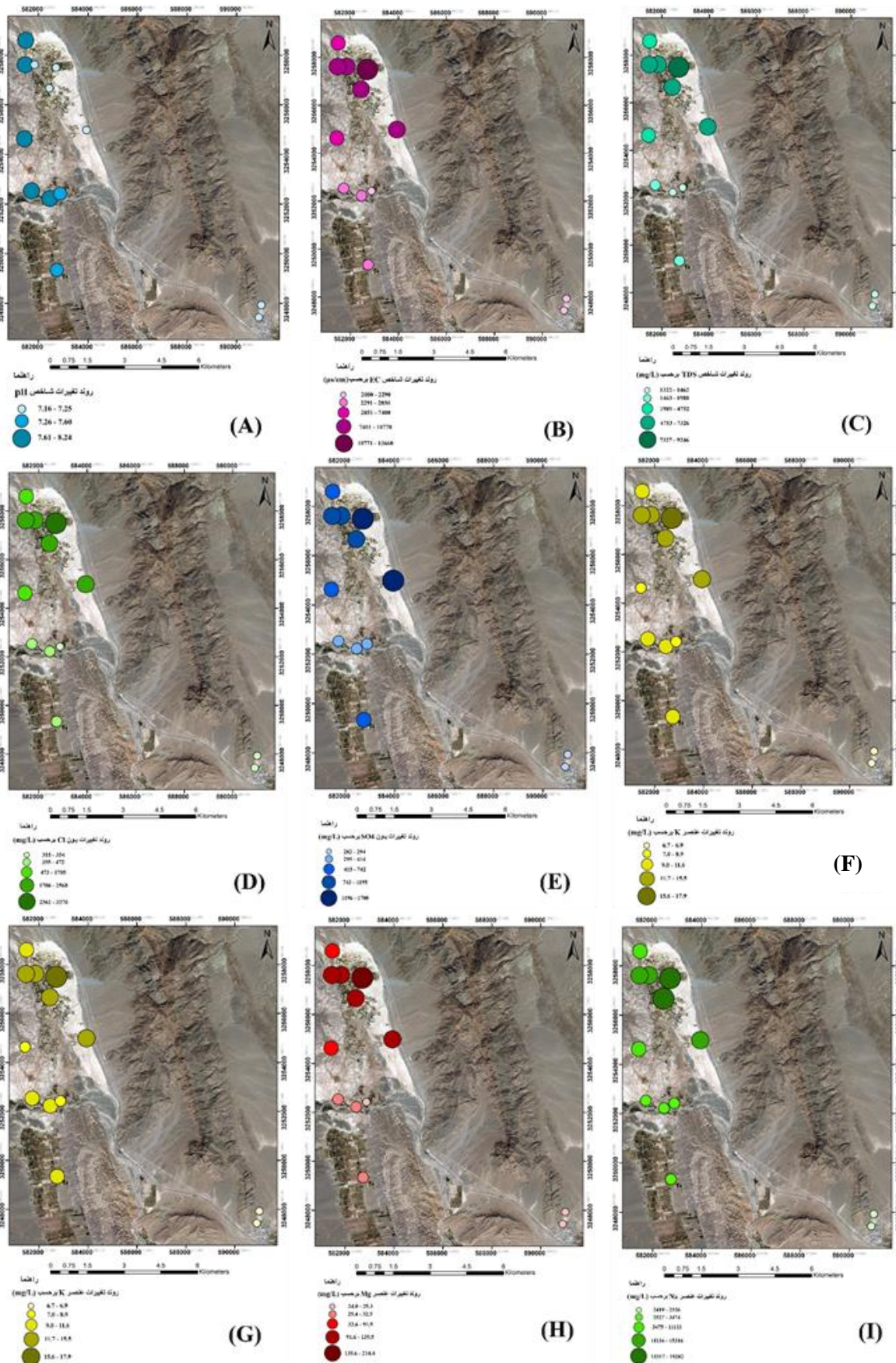
یافته‌های پژوهش

ویژگی‌های کیفی نمونه‌های آب: جدول ۱ توصیف آماری پارامترهای کیفی نمونه‌های آب را نشان می‌دهد. بر این اساس، برخی از مقادیر اندازه‌گیری شده بیش از حد مجاز برای آشامیدن می‌باشند. بررسی متوسط غلظت مقدار آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی نمونه‌های آب منطقه نشان می‌دهد که شرایط آنیونی و کاتیونی حاکم به صورت SO_4^{2-} (366 mg/L) $>$ HCO_3^- (366 mg/L) $>$ Cl^- (1391 mg/L) و Ca^{2+} (104 mg/L) $>$ Mg^{2+} ($80/4 \text{ mg/L}$) $>$ K^+ ($11/50 \text{ mg/L}$) و Na^+ ($90/31 \text{ mg/L}$) می‌باشد. نقشه

جدول ۱- مقادیر غلظت و خلاصه آماری کاتیون و آنیون‌های اصلی و شاخص‌های مهم کیفیت آب (EC) بر حسب $\mu\text{S/cm}$ و پارامترهای دیگر بر حسب mg/L

ردیف	شماره نمونه	محل برداشت نمونه	pH	EC	TDS	Cl	HCO_3	SO_4	Ca	K	Mg	Na
۱	W-1	چاه آب جلگه	۷/۱۶	۱۳۶۶۰	۹۲۴۶	۳۳۷۰	۵۵۰	۱۷۰۰	۱۵۲/۸	۱۷/۹	۲۱۴/۴	۱۹۲۸۲
۲	W-2	چاه آب خانه خاتون	۷/۲۵	۱۰۷۷۰	۷۳۲۶	۲۵۶۰	۳۹۵	۱۱۹۵	۱۲۱/۶	۱۳/۶	۱۱۷/۱	۱۷۱۳۴
۳	W-3	چاه آب روستای نوگور	۷/۲	۹۷۱۰	۶۵۲۶	۲۲۵۶	۳۵۷	۱۱۱۰	۱۲۵	۱۵/۵	۱۲۴/۹	۱۴۴۶۷
۴	W-4	قنات گودال	۸/۲	۷۴۰۰	۴۷۵۲	۱۷۰۵	۳۷۹	۷۴۲	۹۵	۱۱/۶	۹۱/۵	۱۱۱۳۳
۵	W-5	قنات سه‌نیون	۸	۹۳۱۰	۵۷۵۲	۲۲۰۳	۴۸۳	۱۰۴۸	۱۱۹/۵	۱۴/۶	۱۲۳/۸	۱۳۹۲۰
۶	W-6	قنات شمس آباد	۷/۸۵	۵۶۷۰	۳۶۲۶	۱۳۱۲	۴۰۶	۵۲۱	۹۸/۷	۸/۹	۶۹/۷	۸۱۳۲
۷	W-7	چشمه تهرود	۷/۹۸	۲۶۳۰	۱۷۶۴	۳۹۴	۳۰۲	۳۳۷	۸۷/۳	۱۰/۹	۳۰/۸	۳۲۸۲
۸	W-8	رودخانه تهرود	۸/۲۴	۲۶۵۰	۱۳۹۰	۴۴۶	۲۷۵	۴۱۴	۸۱/۸	۱۱/۲	۳۱/۲	۳۳۱۷
۹	W-9	چاه آب وحدت	۷/۶	۲۸۵۰	۱۹۸۸	۴۷۲	۳۱۳	۴۹۸	۱۰۸/۸	۱۰/۳	۳۲/۵	۳۴۷۴
۱۰	W-10	قنات محمود آب تهرود	۷/۵	۲۲۹۰	۱۴۶۲	۳۵۴	۲۵۴	۳۵۳	۷۷/۶	۸/۵	۲۴/۵	۳۰۰۱
۱۱	W-11	چاه آب نظری	۷/۲۱	۹۸۹۰	۶۰۸۸	۲۳۷۴	۳۷۴	۱۵۳۰	۱۱۹/۱	۱۳	۱۳۵/۵	۱۵۳۱۶
۱۲	W-12	چشمه آبگرم ابارق	۷/۲۳	۲۱۶۰	۱۴۰۶	۳۲۸	۲۸۵	۲۹۴	۸۸/۹	۶/۹	۲۵/۳	۲۵۲۶
۱۳	W-13	چشمه طبیعی ابارق	۷/۱۸	۲۰۰۰	۱۳۲۲	۳۱۵	۲۹۶	۲۸۲	۷۶/۲	۶/۷	۲۴	۲۴۱۹
۱۴	W-14	تکرار نمونه W-12	۷/۳۵	۲۰۸۰	۱۳۹۰	۳۱۵	۳۰۷	۳۳۹	۸۷/۶	۶/۹	۲۴/۷	۲۴۸۰
۱۵		میانگین	۷/۵۸	۶۲۳۰	۴۰۵۰	۱۳۹۱	۳۶۶	۷۷۱	۱۰۴/۰۲	۱۱/۵	۸۰/۴	۹۰۳۱
۱۶		میانه	۷/۵	۵۶۷۰	۳۶۲۶	۱۳۱۲	۳۵۶	۵۲۱	۹۸/۷	۱۱/۲	۶۹/۷	۸۱۳۲
۱۷		انحراف معیار	۰/۴۱	۴۰۷۹	۲۷۲۷	۱۰۷۴	۸۰	۴۹۲	۲۲/۷۳	۲/۳۵	۵۹/۸۳	۶۳۷۶
۱۸		کمینه	۷/۱۶	۲۰۰۰	۱۳۲۲	۳۱۵	۲۷۵	۲۸۲	۷۶/۲	۶/۷	۲۴	۲۴۱۹
۱۹		بیشینه	۸/۲۴	۱۳۶۶۰	۹۲۴۶	۳۳۷۰	۵۵۰	۱۷۰۰	۱۵۲/۸	۱۷/۹	۲۱۴/۴	۱۹۲۸۲
۲۰		WHO, 2011	- ۹/۲ ۶/۵	--	۵۰۰	۳۰۰	--	۲۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۲۰۰
۲۱		Secondary Standards US EPA, 2020	- ۸/۵ ۶/۵	--	۵۰۰	۲۵۰	--	۲۵۰	--	--	--	--

تغییرات مکانی هر یک از پارامترهای کیفی نمونه‌های آب منطقه در شکل ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج، میزان pH نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه از حداقل ۷/۱۶ تا حداکثر ۸/۲۴ متغیر است. براساس استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) و سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US EPA, 2020) مقدار pH در تمام نمونه‌های آب بررسی شده در محدوده مجاز برای آب آشامیدن (۹/۵-۶/۲) قرار دارد. گستره تغییرات EC نمونه‌های آب بررسی شده بین $2000 \mu\text{S/cm}$ تا $13660 \mu\text{S/cm}$ است که بیشترین میزان آن مربوط به نمونه‌های آب W-1 ($13660 \mu\text{S/cm}$)، W-2 ($10770 \mu\text{S/cm}$) و W-3 ($9710 \mu\text{S/cm}$) می‌باشد. این نمونه‌ها همگی در گودی حوضه آبریز (پلایای رسی) قرار گرفته‌اند. به نظر می‌رسد که مقادیر بالای EC در این بخش می‌تواند ناشی از فرآیند تبخیر و انحلال کانی‌های تبخیری و نیز تأثیر زمان بیشتر ماندگاری آب باشد. هدایت الکتریکی در آب به‌صورت مستقیم ناشی از غلظت یون‌های موجود در آب بوده و هدایت الکتریکی بالا با شوری بالا و درصد بالای املاح معدنی در آب زیرزمینی مرتبط است.



شکل ۲- A تا I نقشه تغییرات مکانی پارامترهای کیفی (pH, EC, TDS, Ca, Mg, K, Na) نمونه‌های آب منطقه تهرود

جدول ۲- طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی بر اساس میزان TDS

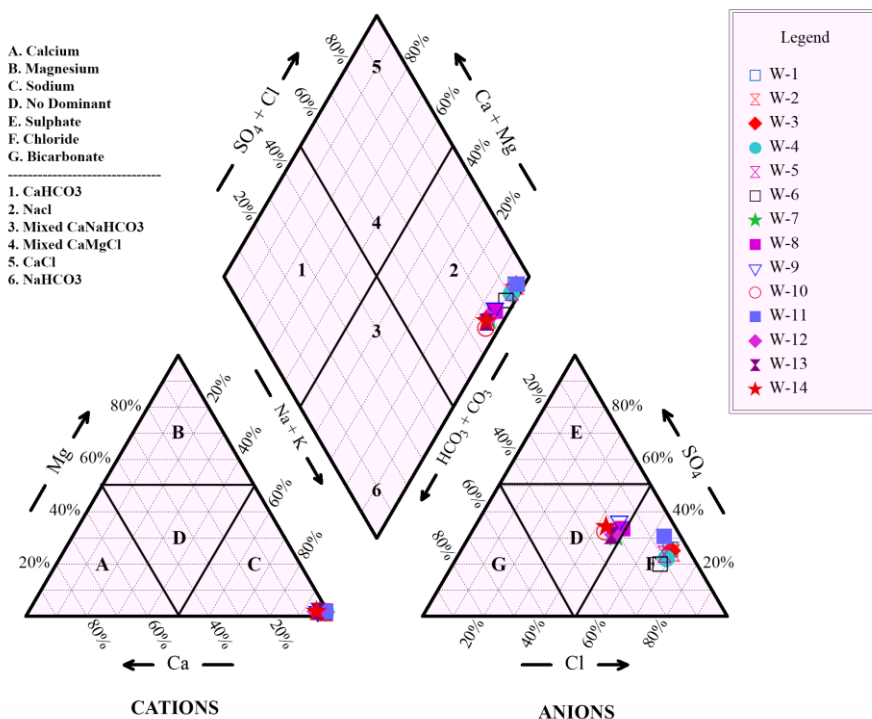
تعداد نمونه‌ها	رده بندی آب	مقدار (mg/L)	پارامتر
--	مناسب برای آشامیدن	<۵۰۰	TDS (Davis and De Wiest, 1966)
--	مجاز برای آشامیدن	۵۰۰-۱۰۰۰	
۷	قابل استفاده برای آبیاری	۱۰۰۰-۳۰۰۰	
۷	نامناسب برای آشامیدن	>۳۰۰۰	
--	آب شیرین	<۱۰۰۰	TDS (Freeze and Cherry, 1979)
۱۴	آب لب شور	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	
--	آب شور	۱۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰	
--	آب بی نهایت شور	>۱۰۰۰۰۰	

کمترین میزان EC نیز مربوط به نمونه‌های W-10 (۲۲۹۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$)، W-12 (۲۱۶۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$) و W-13 (۲۰۰۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$) است. سازمان حفاظت محیط زیست ایران مقدار ۱۰۰۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$ را به‌عنوان حد مجاز شاخص EC در منابع آب شرب تعریف نموده است (Iran Environmental Protection Department., 2016). بر این اساس هیچ یک از نمونه‌های آب بررسی شده در محدوده مجاز آب شرب قرار نمی‌گیرد.

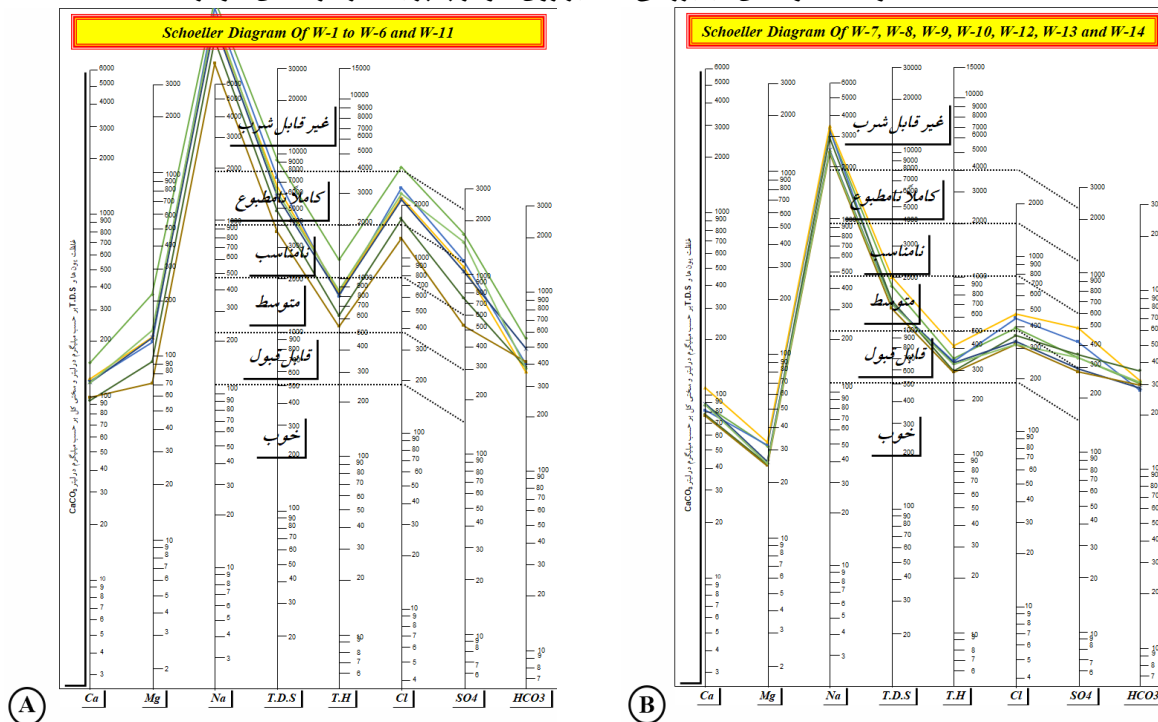
بر اساس استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) و سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US EPA, 2020) مقدار پارامتر TDS تقریباً در تمام نمونه‌های آب بررسی شده فراتر از حد مجاز ۵۰۰ mg/L تعریف شده قرار دارد. غلظت یون‌های Cl^- ، SO_4^{2-} و Na^+ تقریباً در تمام نمونه‌های آب فراتر از مقدار استاندارد تعریف شده (WHO, 2011) برای آن‌ها (۲۵۰ mg/L برای Cl^- و SO_4^{2-} و ۲۰۰ mg/L برای Na^+) است؛ اما میزان غنی‌شدگی این یون‌ها در نمونه‌های آب زیرزمینی W-1 تا W-6 و همچنین W-11 در مقایسه با سایر نمونه‌ها بسیار بیشتر می‌باشد. مقدار یون Ca^{2+} نیز در این نمونه‌ها مقداری از استاندارد تعریف شده (WHO, 2011، ۱۰۰ mg/L) فراتر می‌باشد. محدوده تغییرات این یون در نمونه‌های آب بررسی شده بین ۷۶/۲ mg/L تا ۱۵۲/۸ mg/L تغییر می‌کند. از نظر میزان پتاسیم نمونه‌های آب بررسی شده دارای کیفیت مطلوب می‌باشند. از نظر میزان منیزیم نیز به جز نمونه W-1 که منیزیم نسبتاً زیادی دارد در بقیه موارد میزان منیزیم در حد مجاز قرار دارد. بازه تغییرات این یون بین ۲۴ mg/L تا ۲۱۴/۴ mg/L در نوسان بود.

رخساره هیدروشمیایی نمونه‌های آب: یکی از روش‌های معمول در تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی استفاده از نمودار پایپر می‌باشد (Piper, 1994). نمودار پایپر از ترکیب سه میدان مجزا درست شده است که درصد آنیون‌ها و کاتیون‌ها در میدان‌های مثلثی و موقعیت ترکیبی آن‌ها در میدان لوزی شکل پیاده می‌شود. درصد آنیون‌ها و کاتیون‌ها بر حسب میلی اکی‌والان بر لیتر محاسبه می‌شود. بر اساس موقعیت نمونه‌های آب بر روی نمودار پایپر (شکل ۳)، با توجه به غالب بودن کاتیون و آنیون سدیم و کلر، تیپ آب برای تمامی نمونه‌ها کلروری و رخساره آب نیز برای تمام نمونه‌ها، سدیک می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌ها در سمت راست لوزی قرار گرفته‌اند که بیانگر شوری آب‌های منطقه می‌باشد.

ارزیابی کیفیت نمونه‌های آب از نظر شرب: جهت ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی از نظر مصارف شرب از نمودار نیمه لگاریتمی شولر استفاده می‌شود. برای رسم این نمودار از غلظت سه کاتیون اصلی (Ca^{2+} ، Mg^{2+} و Na^+)، سه آنیون اصلی (Cl^- ، SO_4^{2-} و HCO_3^-) و شاخص‌های TDS و TH استفاده می‌شود. بر اساس نمودار شولر، نمونه‌های آب از لحاظ کیفیت شرب می‌توانند به ۶ دسته خوب، قابل قبول، متوسط و دارای مزه، نامناسب، کاملاً نامطبوع و غیر قابل شرب تقسیم شوند (Schoeller, 1962). جهت مقایسه بهتر برای ترسیم نمودار شولر تعداد نمونه‌ها به ۲ گروه تقریباً مساوی مربوط به نمونه‌های پلایای رسی و دیگر نمونه‌ها تقسیم شده‌اند. در شکل ۴ طبقه‌بندی شولر برای کیفیت آب شرب منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های آب بررسی شده دارای کیفیت نامطلوب تا غیر قابل استفاده برای شرب و حتی برای کشاورزی در برخی نمونه‌ها هستند.



شکل ۳- موقعیت نمونه‌های آب بررسی شده بر روی نمودار پایپر به همراه راهنمای نمودار



شکل ۴- نمودار شولر نمونه‌های مربوط به پلایای رسی (A) و سایر نمونه‌های آب بررسی شده (B)

غلظت عناصر فرعی و کمیاب: بررسی نتایج آنالیز ICP-MS نشان می‌دهد که از مجموع ۵۴ عنصر آنالیز شده تنها غلظت ۱۶ عنصر Al, Cu, Cr, Ba, As, Mo, Li, Ni, Nb, P, Rb, S, Sc, Se, Si و Sr در نمونه‌های آب قابل سنجش می‌باشد و سایر عناصر دارای غلظت پایین‌تر از حد تشخیص دستگاه ICP-MS هستند. در بین این ۱۶ عنصر تنها ۸ عنصر Al, As, Ba, Cr, Cu, Mo, Ni و Se طبق استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) و سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US EPA, 2020) دارای استاندارد تعریف شده برای منابع آب شرب می‌باشند؛ در حالی که برای بقیه عناصر استاندارد از سوی این

جدول ۳- غلظت عناصر فرعی و کمیاب در نمونه‌های آب بررسی شده (Al بر حسب mg/l و بقیه عناصر بر حسب $\mu\text{g/l}$)

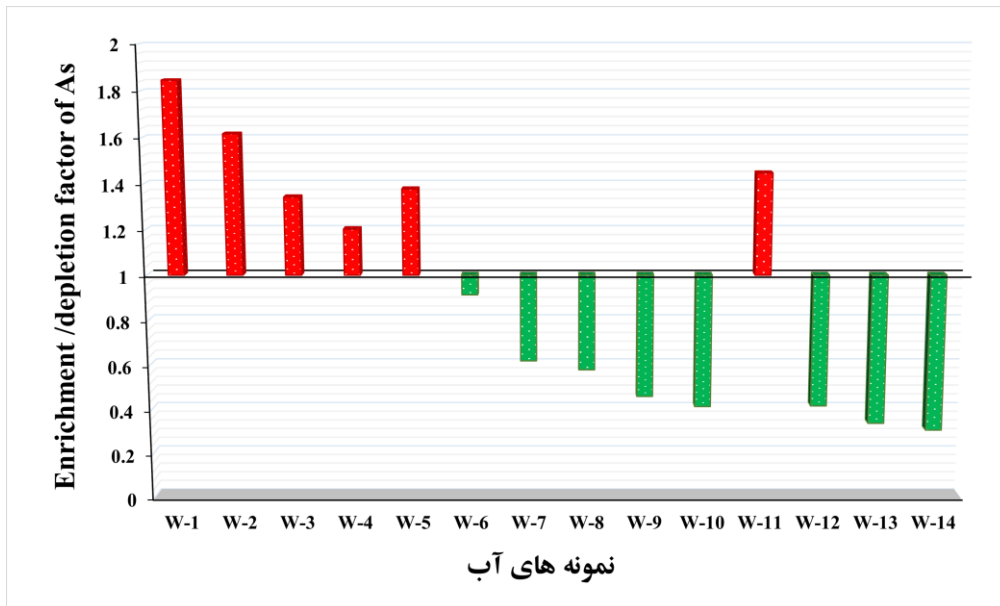
ردیف	شماره نمونه	محل برداشت نمونه	Al	As	Ba	Cr	Cu	Mo	Ni	Se
۱	W-1	چاه آب جلگه	۰/۰۳	۱۸/۴۶	۱/۶۲	۲۰/۹۷	۴/۶۷	۱/۲۱	۳/۲۸	۳۳/۹۷
۲	W-2	چاه آب خانه خاتون	۰/۰۳	۱۶/۱۶	۲/۲۳	۱۸/۷۸	۳/۲۵	۱/۳۴	۳/۱۰	۲۳/۶۳
۳	W-3	چاه آب روستای نوگور	۰/۰۳	۱۳/۴۲	۲/۴۹	۱۶/۹۵	۲/۸	۱/۳۶	۳/۱۳	۲۱/۱۹
۴	W-4	قنات گودال	۰/۰۴	۱۲/۰۲	۲/۲۱	۱۵/۲	۱/۹۸	۱/۰۸	۱/۵۵	۱۶/۰۷
۵	W-5	قنات سه‌نیون	۰/۰۲	۱۳/۷۷	۲/۸۸	۱۷/۳	۲/۵۵	۱/۱۲	۱/۷۸	۱۹/۰۶
۶	W-6	قنات شمس آباد	۰/۰۲	۹/۱۳	۲/۵۲	۱۲/۸۴	۱/۱۶	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۲/۶۷
۷	W-7	چشمه تهرود	۰/۰۲	۶/۱۸	۸/۶۲	۸/۰۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۶/۳۹
۸	W-8	رودخانه تهرود	۰/۰۲	۵/۷۸	۸/۴۵	۷/۹۴	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۵/۴۶
۹	W-9	چاه آب وحدت	۰/۰۲	۴/۵۸	۴/۷۷	۷/۱۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۱	۶/۸۲
۱۰	W-10	قنات محمود آب تهرود	۰/۰۲	۴/۱۲	۴/۴	۹/۱۶	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۳/۹۹
۱۱	W-11	چاه آب نظری	۰/۰۲	۱۴/۴۷	۱/۷۹	۱۷/۲۱	۳/۲۷	۱/۰۰	۲/۴۲	۲۲/۸۱
۱۲	W-12	چشمه آبگرم ابارق	۰/۰۲	۴/۱۵	۵/۲۷	۷/۸۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۴/۲۲
۱۳	W-13	چشمه طبیعی ابارق	۰/۰۲	۳/۳۶	۴/۷۱	۸/۶۴	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۴/۳
۱۴	W-14	تکرار نمونه W-12	۰/۰۲	۳/۰۵	۵/۲۷	۷/۳۶	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۳/۹۹
۱۵		میانگین	۰/۰۲۳	۹/۶۶	۴	۱۲/۹۲	۱/۹۷	۱/۰۸	۱/۷۱	۱۳/۸۹
۱۶		میانه	۰/۰۲	۹/۱۳	۲/۸۸	۱۲/۸۴	۱/۱۶	۱	۱/۰۱	۱۲/۶۷
۱۷		انحراف معیار	۰/۰۰۶۵	۵/۲۷	۲/۳۵	۵	۱/۲۲	۰/۱۳	۰/۹۳	۹/۶۸
۱۸		کمینه	۰/۰۲	۳/۳۶	۱/۶۲	۷/۱۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۳/۹۹
۱۹		بیشینه	۰/۰۴	۱۸/۴۶	۸/۶۲	۲۰/۹۷	۴/۶۷	۱/۳۶	۳/۲۸	۳۳/۹۷
۲۰		WHO, 2011	۰/۰۲	۱۰	۱۳۰۰	۵۰	۲۰۰۰	۷۰	۷۰	۴۰
		MCLG ¹	--	۰	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۳۰۰	--	--	۵۰
		MCLG ²	--	۱۰	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۳۰۰	--	--	--
		US EPA, 2020	--	--	--	--	۱۰۰۰	--	--	--
		Secondary Standards	۰/۰۵-۰/۲	--	--	--	--	--	--	--

1: MCLG, Maximum Contamination Level Goal

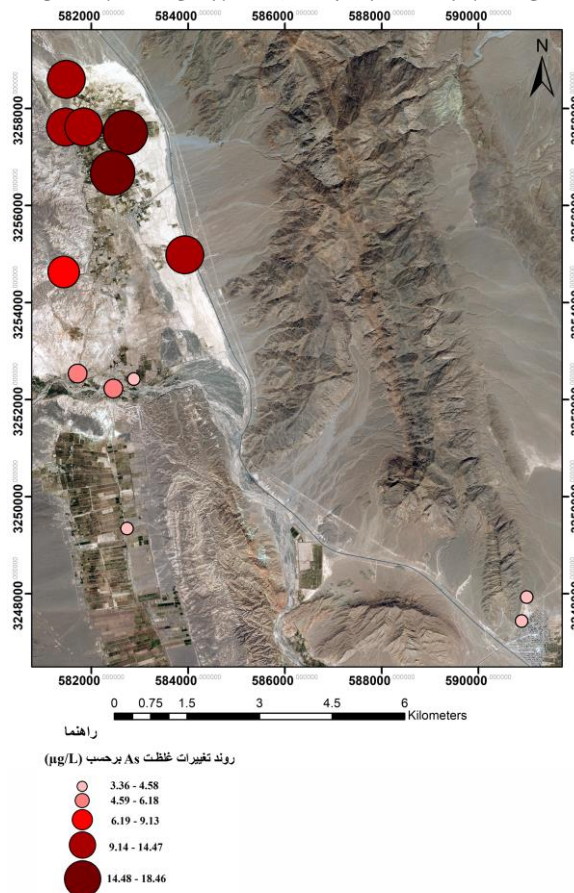
2: MCL, Maximum Contamination Level

سازمان‌ها تعریف نشده است. در جدول ۳ علاوه بر مقادیر غلظت عناصر فرعی و کمیاب در نمونه‌های آب به همراه استانداردهای آن‌ها، مقادیر میانگین، میانه، انحراف معیار و مقادیر کمینه و بیشینه نیز ارائه شده است. مقایسه غلظت عناصر فرعی و کمیاب در منابع آب منطقه مورد مطالعه با استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) و سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US EPA, 2020) نشان می‌دهد که غلظت عناصر Al, Ba, Cr, Cu, Ni, Mo و Se در همه نمونه‌های آب در گستره مجاز برای آشامیدن قرار دارند. با این حال در رابطه با آرسنیک، برخی از نمونه‌های آب دارای مقادیر بالاتر از استاندارد ($10 \mu\text{g/L}$) هستند که در ادامه این موضوع بیشتر شرح داده می‌شود.

برای عنصر آرسنیک غلظت $10 \mu\text{g/L}$ توسط سازمان‌های بهداشت جهانی (WHO, 2011) و حفاظت محیط‌زیست آمریکا (US EPA, 2020) به عنوان حد مجاز در منابع آب شرب در نظر گرفته شده است. شکل ۵ نمودار افزودگی-کاهیدگی و شکل ۶ نقشه تغییرات مکانی غلظت عنصر آرسنیک در نمونه‌های آب بررسی شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ۶ نمونه از ۱۳ نمونه آب بررسی شده غنی‌شدگی عنصر آرسنیک را نشان می‌دهند. این نمونه‌ها مربوط به آب‌های زیرزمینی شامل نمونه‌های آب چاه‌های W-1, W-2, W-3, W-11 و نمونه‌های آب قنات‌ها W-4 و W-5 می‌باشند. از مهم‌ترین دلایل آلودگی آرسنیک

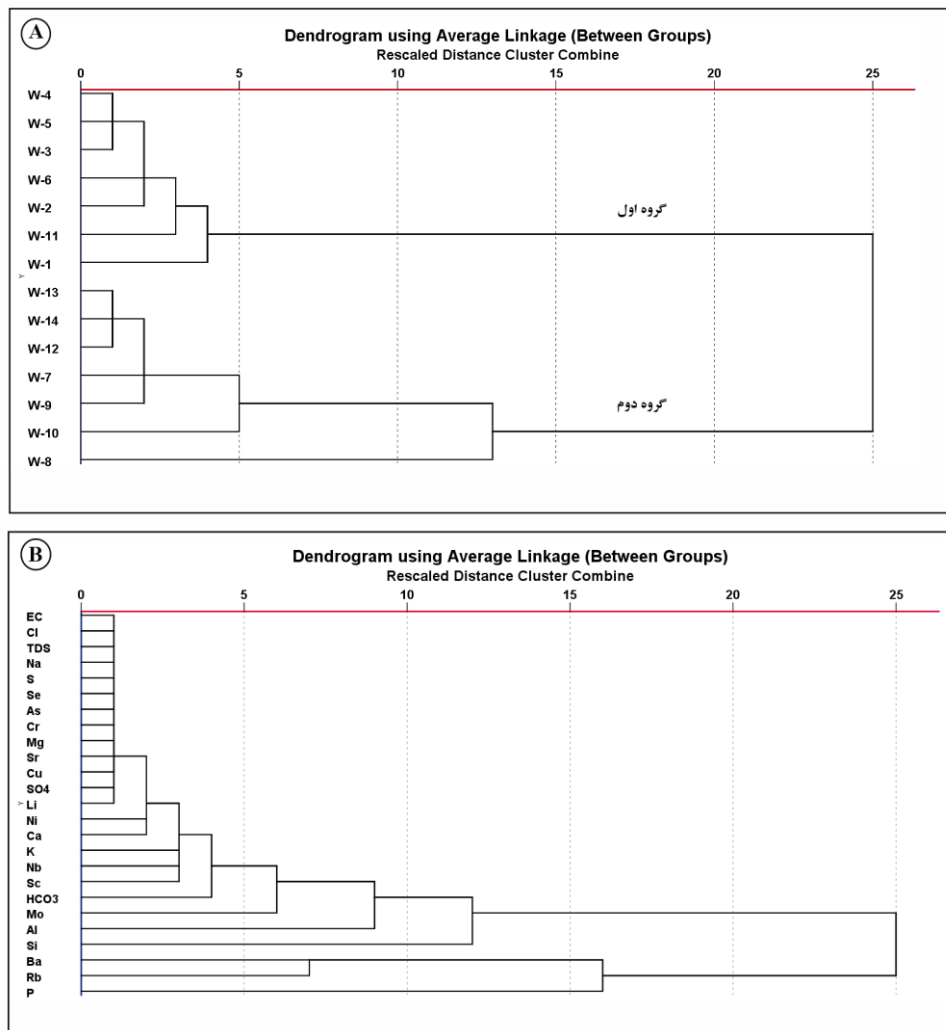


شکل ۵- نمودار افزودگی-کاهیدگی عنصر آرسنیک در نمونه‌های آب بررسی شده بر اساس استاندارد آب شرب ($1 \mu\text{g/l}$)



شکل ۶- نقشه تغییرات مکانی غلظت عنصر آرسنیک در نمونه‌های آب منطقه تهرود

در دنیا غلظت بالای آرسنیک در آب‌های آشامیدنی با منشاء طبیعی می‌باشد (Sharma and Sohn, 2009). در استان کرمان نیز بررسی‌های زیادی در خصوص غنی‌شدگی طبیعی آرسنیک به‌ویژه در پهنه آتشفشانی دهج-ساردوئیه صورت گرفته است (Khorasanipour and Esmailzadeh, 2016). در این مطالعات چندین منشاء و یا عامل زمین‌شناسی نظیر فرآیندهای ژئوترمال، واجذب در شرایط قلیایی، انحلال اکسی هیدروکسیدهای آهن و تبخیر برای بالا بودن میزان آرسنیک در منابع آب نسبت داده شده است (Khajehpour, 2007; Ebrahimi, 2009; Mirzaie, 2012; Abbasnejad et al., 2013; Pazand and)



شکل ۷- تحلیل نتایج حاصل از آنالیزهای نمونه‌های آب با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای (A): گروه‌بندی نمونه‌ها، B: گروه‌بندی متغیرها

(Javanshir, 2013). این غنی‌شدگی علاوه بر استان کرمان در سایر بخش‌های کمربند آتشفشانی ایران مرکزی از آذربایجان تا سیستان به طول ۱۲۵۰ کیلومتر و عرض ۴۰ تا ۸۰ کیلومتر مشاهده شده است (Asadi *et al.*, 2014).

تحلیل نتایج با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای: آنالیز خوشه‌ای (Cluster Analysis) CA یکی از روش‌های آماری چند متغیره است که برای گروه‌بندی متغیرها و یا نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف CA شناخت متغیرهای شبیه به یکدیگر در یک خوشه یا گروه بر پایه شباهت‌های یک رده و یا عدم شباهت با رده و کلاس‌های دیگر می‌باشد (Spark, 2000). در این پژوهش، از روش خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (Hierarchical Cluster Analysis) برای تحلیل نتایج استفاده شد. ارزیابی نتایج با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای در شکل ۷ ارائه شده است. بر این اساس، نمونه‌های آب بررسی شده در دو گروه اصلی قرار می‌گیرند که عمدتاً از نظر هدایت الکتریکی و یون‌های وابسته به آن متفاوت هستند. گروه اول شامل نمونه‌های W-1 تا W-6 به همراه W-11 می‌باشند و در گروه دوم نیز نمونه‌های W-7 تا W-14 (به جز W-11) قرار می‌گیرند.

براساس روش آماری آنالیز خوشه‌ای متغیرهای هیدروژئوشیمیایی بررسی شده در نمونه‌های آب به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

(۱) متغیرهای EC, Cl, TDS, Na, S, Se, As, Cr, Mg, Sr, Cu, SO_4^{2-} , Li, Ni, Ca و K دارای همبستگی بسیار

بالایی با یکدیگر می‌باشند و در یک گروه قرار می‌گیرند. عناصر Mo, Sc, Nb و بی‌کربنات نیز با این گروه ارتباط دارند.

(۲) متغیرهای Al و Si هر کدام در گروه‌های جداگانه قرار می‌گیرند.

(۳) متغیرهای Ba, Rb و P با ارتباط نسبتاً ضعیفی در یک گروه قرار دارند.

همان گونه که مشاهده می شود ویژگی های عمومی نمونه های آب توسط یون های کلر و سدیم کنترل شده و از طرفی پتانسیل های غنی شدگی و تا حدودی آلودگی عناصر بالقوه آلاینده؛ به ویژه As با چاه هایی ارتباط دارد که دارای EC، TDS، SO_4^{2-} ، Na و Cl بالاتری هستند. این شاخص ها مربوط به نمونه های آب W-1 تا W-6 و W-11 هستند که در گودی حوضه آبریز و در پلایای رسی قرار دارند.

بحث و نتیجه گیری

شوری منابع آب از آشکارترین پدیده های تنزل کیفیت آب در مناطق خشک و نیمه خشک می باشد. عوامل متعددی نظیر عدم تغذیه مناسب، واکنش های بین آب و سنگ مانند انحلال سنگ های تبخیری و پدیده تبادل کاتیونی، تبخیر از آب های زیرزمینی، اختلاط آب ها مانند نفوذ آب شور دریا به آبخوان های ساحلی و آب های برگشتی کشاورزی می توانند شوری آب های زیرزمینی را کنترل نمایند (Vengosh, 2014). نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی نمونه های آب نشان می دهد که حضور عناصر اصلی Na ، Cl و SO_4^{2-} با محدوده تغییرات به ترتیب 2419 mg/L تا 19283 mg/L ، 315 mg/L تا 3370 mg/L و 282 mg/L تا 1700 mg/L در غلظت های بالا عامل افزایش EC در منطقه است. نتایج حاصل از ترسیم نمودار پایپر نیز نشان می دهد که تیپ غالب آب برای تمامی نمونه های آب، کلروره و رخساره آن نیز برای تمام نمونه ها، سدیک می باشد. براساس نمودار شولر و همچنین به دلیل مقادیر بالای Cl^- (1391 mg/L)، Na^+ (9031 mg/L) و SO_4^{2-} (771 mg/L) و شاخص TDS (4050 mg/L) منابع آب منطقه مورد مطالعه جهت مصارف شرب نامطلوب تا غیر قابل شرب می باشند. همچنین مقایسه کل جامدات محلول با دیگر استانداردهای موجود نشان داد که تمامی نمونه های آب در طبقه آب های لب شور قرار می گیرند و برای مصرف شرب مناسب نیستند. تحلیل نتایج با استفاده از روش آماری آنالیز خوشه ای نیز نمونه های آب را در دو خوشه مجزا قرار می دهد که عمدتاً از نظر هدایت الکتریکی و یون های وابسته به آن متفاوت هستند. نمونه های خوشه اول که مربوط به پلایای رسی می باشند؛ میزان EC، TDS، Na، Cl و SO_4^{2-} بالایی دارند. مقادیر عناصر فرعی و کمیاب Al، Ba، Cr، Cu، Mo، Ni و Se براساس استانداردهای جهانی WHO و EPA در حد مجاز می باشند و فقط عنصر آرسنیک در برخی از نمونه ها غنی شدگی ضعیف نشان می دهند.

با توجه به موقعیت زمین شناسی منطقه تهران و نقش کوه های آتشفشانی اطراف راین و جبال بارز در تأمین بخش مهمی از منابع آب این منطقه انتظار می رفت غنی شدگی طبیعی آرسنیک در نمونه های آب بررسی شده مشاهده شود. باید توجه داشت که در کانه زایی صورت گرفته در معدن سرب و روی خان خاتون (شرق منطقه مورد مطالعه) نیز پتانسیل آنومالی آرسنیک وجود دارد. با این تفاوت که ماهیت کانه زایی در این معدن بر خلاف معادن مس در سنگ های آهنی رسوبی می باشد که پتانسیل تحرک آرسنیک را محدود می نماید. در پژوهش انجام شده در حوضه بالادست منطقه تهران بر روی فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت آب های زیرزمینی در دشت راین کرمان، منبع آرسنیک آب های زیرزمینی این دشت طبیعی (ژئوژنیک) تصور می شود. وجود ارتفاعات آتشفشانی هزار در جنوب باختر منطقه و تغذیه سفره آب زیرزمینی از کوه های متشکل از سنگ های آتشفشانی سولفیدار از دلایل آلودگی منابع آب زیرزمینی دشت راین به آرسنیک است (Pazand and Javanshir, 2013). آرسنیک پس از آزاد شدن از کانی های سولفیدی سنگ های آتشفشانی، توسط کانی های رسی، اکسید و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم جذب شده و با افزایش pH (بیش از ۸)، از سطح اکسید و هیدروکسیدهای فلزی آزاد و به شکل محلول وارد سفره آب زیرزمینی می شود (Nazari and Abbasnejad, 2015). در تحقیقی که در سال ۲۰۱۲ توسط Pazand و Sarvestan در خصوص هیدروژئوشیمی آب های زیرزمینی منطقه طبرستان انجام شد نشان داد؛ که آرسنیک در آب های زیرزمینی منطقه در نتیجه هوازگی کانی های سولفیدی مانند آرسنوپیریت آزاد می شود و مقادیر بالای شوری در این منطقه نیز در اثر تبخیر ایجاد می شود که می تواند تا حدی مسئول تجمع برخی عناصر کمیاب نیز باشد که با نتایج این تحقیق منطبق است. در تحقیقی که در سال ۲۰۱۳ توسط Abbasnejad و همکاران در خصوص آلودگی آرسنیک در آب های زیرزمینی آبخوان آبرفتی دشت بردسیر نیز انجام شد؛ مشخص گردید که تجزیه کانی های سولفیدی سنگ های آتشفشانی و آزادسازی آرسنیک موجود در آنها در pH های بالا و همچنین ترکیب با آب های هیدروترمال در این دشت باعث آلودگی آرسنیک شده است که با نتایج این تحقیق نیز همخوانی دارد.

مکانیسم آزادسازی آرسنیک به سفره های آب زیرزمینی می تواند تحت تأثیر ۴ فرآیند اصلی زیر رخ دهد:

۱. **انحلال احیایی:** در این مکانیسم، واجدبی آرسنیک در pH نزدیک به خنثی از کانی‌های اکسیدی و انحلال احیایی اکسیدهای Fe (III) و Mn (IV) منجر به آزاد شدن آرسنیک به درون آبخوان می‌شود (Petrini *et al.*, 2010).
 ۲. **واجذب قلیایی:** در $pH > 8$ واجدبی آرسنیک از اکسیدهای فلزی به‌ویژه آهن و منگنز می‌تواند منجر به افزایش آرسنیک در آب زیرزمینی شود (Chouhan and Flora, 2010).
 ۳. **اکسایش کانی‌های سولفیدی:** آرسنیک یک عنصر کالکوفیل است و با کانی‌های سولفیدی نظیر پیریت و آرسنو پیریت همراه است؛ بنابراین اکسایش کانی‌های سولفیدی سبب آزادسازی آن به آب زیرزمینی می‌شود (Smedley and Kinniburgh, 2005).
 ۴. **فعالیت‌های ژئوترمال:** اختلاط محلول‌های ژئوترمال و آب زیرزمینی می‌تواند منجر به افزایش غلظت آرسنیک شود (Chouhan and Flora, 2010).
- در واقع، آب‌های زیرزمینی با غلظت بالای آرسنیک معمولاً در دو محیط طبیعی یافت می‌شوند: در آبخوان‌های حوضه‌های بسته با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و در آبخوان‌های آبرفتی دارای شرایط احیاء که هر دو محیط از نظر زمین‌شناسی شامل رسوبات آبرفتی جوان و از نظر توپوگرافی پست و هموار هستند. گردش و سرعت آب زیرزمینی در این آبخوان‌ها بسیار ضعیف و کند است، به طوری که آرسنیک آزاد شده از رسوبات قادر به تجمع در آب‌های زیرزمینی می‌باشد (Smedley and Kinniburgh, 2002).
- مطالعات زیادی در رابطه با هیدروژئوشیمی و کیفیت منابع آب در مناطق مختلف جهان صورت گرفته است. یافته‌های تحقیقی که Asghari-Moghaddam و Barzegar (۲۰۱۵) جهت بررسی عوامل مؤثر بر غلظت بالای آرسنیک در آب زیرزمینی آبخوان‌های دشت تبریز انجام دادند، نشان داد که آرسنیک موجود در منابع آب زیرزمینی منطقه دارای منشأ زمین‌شناسی است و مقادیر غلظت آن به شرایط هیدروژئولوژیکی و احیایی محیط، مدت زمان ماندگاری آب در لایه‌های زیرین زمین و ژرفای چاه بستگی دارد. نتایج مطالعه Abdolahi و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی هیدروژئوشیمی محیط‌زیستی منابع آب زیرزمینی دشت راور (شمال استان کرمان) نشان داد که فرآیند تبخیر و انحلال کانی‌های تبخیری مهم‌ترین فرآیندهای کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی این دشت به حساب می‌آیند. منشأ اصلی فلزات سنگین در این دشت را شیل‌های زغال دار موجود در سازندهای منطقه در نظر گرفتند. نتایج ارزیابی شوری و آرسنیک به‌عنوان عوامل مخرب کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی (حوضه آبریز سد سهند) توسط Nadiri و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان داد که منشأ شوری در منابع آبی منطقه انحلال تشکیلات گچی و نمکی و منشأ اصلی غنی‌شدگی آرسنیک تغلیظ‌اپی ترمال آرسنیک در سازندهای میوسن می‌باشد. همچنین Xu و همکاران (۲۰۱۹) با توصیف هیدروژئوشیمی و ارزیابی کیفی آب‌های زیرزمینی کم عمق برای آبیاری در حوضه مرکزی غربی گوانزو چین به این نتیجه رسیدند که فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی تأثیرگذار در این حوضه هوازدگی سنگ‌ها، تبادل یونی و تبخیر می‌باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های گروه شرکت‌های ایبکو، به‌ویژه جناب آقای دکتر بابک اسماعیلی، مهندس علی آرمیده و مهندس امیر موسی صوفی آبادی جهت انجام فرآیند نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها کمال تشکر را می‌نمایند.

References

- Abbasnejad, A., Mirzaie, A., Derakhshani, R., Esmailzadeh, E., 2013. Arsenic in groundwaters of the alluvial aquifer of Bardsir plain, SE Iran. *Environmental Earth Sciences* 69, 2549-57.
- Abdolahi, M., Qishlaqi, A., Abbasnejad, A., 2015. Environmental hydrogeochemistry of groundwater resources of the Ravar plain, Northern Kerman province, Iran. *Journal of Environmental Studies* 41(1)81-95. (In Persian)
- Asadi, S., Moore, F., Zarasvandi, A., 2014. Discriminating productive and barren porphyry copper deposits in the southeastern part of the central Iranian volcano-plutonic belt, Kerman region, Iran: A review. *Earth Science Review* 138, 25-46.

- Asghari Moghaddam, A., Barzegar, R., 2015. Considering factors affecting high Arsenic concentration in groundwater resources of Tabriz plain aquifers. *Geosciences* 24(94), 177-190. (In Persian)
- Bouwer, H., 1978. *Ground water*. New York. Mc Graw-Hill Inc.
- Chan, H.J., 2001. Effect of landuse and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea. *Journal of Hydrology* 253, 194-210.
- Chandrasekharam, D., Bundschuh, J., 2002. Geochemistry of thermal waters and thermal gases. *Geothermal Energy Resources for Developing Countries* 253-267.
- Chouhan, S. Flora, S.J.S., 2010. Arsenic and fluoride: Two major groundwater pollutants. *Indian Journal of Experimental Biology* 48, 666-678.
- Davis, S.N., and De Wiest, R.J.M., 1966. *Journal of Hydrogeology*. Krieger Publication Company.
- Ebrahimi, M., 2009. Evaluation of Arsenic dispersivity and the survey of the source of Arsenic in Groundwaters of Rafsanjan plain and represent the suitable ways of removal arsenic. M.Sc. Thesis Shahid Bahonar University of Kerman. (In Persian)
- Freeze, A., and Cherry, J., 1979. *Groundwater*, Engle wood cliffs, prentice- Hall, Inc.
- Hassanzadeh, R., Abbasnejad, A., Hamzeh, M.A., 2011. Assessment of groundwater pollution in Kerman urban areas. *Journal of Environmental Studies* 36(56), 101-110. (In Persian)
- Hem, J., 1989. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. US Geological Survey Water-Supply, p 2254.
- Hounslow, A.W., 1995. *Water Quality Data: Analysis and interpretation*. Lewis Publisher.
- Iran Environmental Protection Department., 2016. *Human Environment Deputy, Water and Soil Office. Iranian water quality standard*.
- Jalali, L., Asghari Moghaddam, A., 2013. Detection of Hydrogeochemical status and salinity Trend in Khoy plain Aquifer by statistical and hydrochemical Methods. *Journal of Environmental Studies* 39(2), 113-122. (In Persian)
- Khajehpour, S., 2007. Assessment of the concentration of heavy metals in groundwaters of Southern Rafsanjan Plain, focusing on the likely effects of Sarcheshmeh Copper Complex. M.Sc. Thesis Shahid Bahonar University of Kerman. 154 p. (In Persian)
- Khorasanipour, M., Esmaeilzadeh, E., 2015. Geo-genic arsenic contamination in the Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Kerman, Iran: Implications for the source identification and regional analysis. *Applied Geochemistry* 63, 610-622.
- Khorasanipour, M., Jafari, Z., 2018. Environmental geochemistry of rare earth elements in Cu-porphyry mine tailings in the semiarid climate conditions of Sarcheshmeh mine in southeastern Iran. *Chemical Geology* 477, 58-72.
- Mirzaie, A., 2012. Arsenic concentration in groundwater of Bardsir plain and its environmental implication. M.Sc. Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman. 170 p. (In Persian)
- Mishra, P.C., Behera, P.C., And Patel, P.K., 2005. Contamination of water due to major industries and open refuse dumping in the steel city of Orissa-a case study. *Journal of Environmental Science and Engineering* 47(2), 141-154.
- Nadiri, A.A., Asghari Moghaddam, A., Sadeghi Aghdam, F., Naderi, K., 2015. The assessment of salinity and Arsenic as the Destructive factors affecting on surface and groundwater quality of Sahand Dam water basin. *Journal of Hydrogeomorphology* 2(4), 79-99.
- Nazari, Y., Abbasnejad, A., 2015. Determining the origin and distribution of Arsenic in Groundwater in the Rayen Plain (Southeast of Kerman) using Statistical Techniques. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 24(94), 117-128. (In Persian)
- Pazand, K., Javanshir, A.R., 2013. Hydrogeochemistry and Arsenic contamination of groundwater in the Rayen area, southeastern Iran. *Environmental Earth Sciences* 70, 2633-2644.
- Pazand, K., Sarvestani, J.F., 2013. Hydrogeochemical investigation in an arid region of Iran (Tabas, Central Iran). *Environmental Earth Sciences* 70, 743-752.
- Petrini, R., Slejko, F., Lutman, A., Pison, S., Franceschini, G., Zini, L., Italiano, F., and Galic, A., 2010. Natural arsenic contamination in waters from the Pesariis village, NE Italy. *Environmental Earth Sciences* 62, 481-491.
- Piper, A.M., 1944. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions* 25, 914-923.

- Qara-Mahmudlou, M., Heshmatpour, A., Jandaghi, N., Zare, A., Mehrabi, H., 2018. Assessment of groundwater quality in Seydan-Farooq plain for irrigation and drinking purposes. *Environmental Sciences* 17(3), 106 -89.
- Schoeller, H., 1962. *Lexsouterraines*. Masson Paris.
- Sedaghat, M., 2008, *Land and water resources (underground water)*. Payam Noor University Press. (In Persian)
- Sharma, V.K., Sohn, M., 2009. Aquatic arsenic: toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environment international* 35(4), 743-759.
- Smedley, P.L. and Kinnibourg, D.G., 2005. Arsenic in groundwater and in the environment. In Selinus, O. (eds.), *Essentials of Medical Geology* Elsevier 263-300 Amsterdam.
- Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17, 517-568.
- US EPA (US Environmental Protection Agency)., 2020. National primary and secondary regulations. <http://www.epa.gov/safewater>.
- Vengosh, A., 2014. *Salinization and Saline Environments*. Duke University, Durham NC, USA, Elsevier.
- World Health Organization, (WHO)., 2011. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. Fourth ed. (Available on http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/en/).
- Xu, P., Feng, W., Qian, H., Zhang, Q., 2019. Hydrogeochemical characterization and irrigation quality assessment of shallow groundwater in the Central-Western Guanzhong Basin, China. *International journal of environmental research and public health* 16(9), 1492.
- Zamani Farahani, F., 2015. *Hydrochemistry of the Brines playa Mighan, and relationship between the chemical composition of the brines and evaporitic minerals with type formations and input streams*. 8th National Geological Conference of Payam Noor University. (In Persian)
- Zhang, C., 2007. *Fundamentals of environmental sampling and analysis*. Wiley, New York.