



Research Article

Hydrogeochemical assessment of Cheshmeh Kileh catchment (Mazandaran Province) by ArcGIS and AqQA software, case comparison of Dohezar and Sehezar sub-basins

Nikoo Shiroud Issa¹, Alireza Ganji^{*1} , Ali Moghimi Kandelous¹, Saeid Hakimi Asiabar¹

1-Department of Geology, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Received: 14 Apr 2023 Accepted: 02 Nov 2023

Extended Abstract

Introduction: Rivers are crucial for the society because they provide fresh water for agriculture, human needs, industry and transportation. Therefore, water quality assessment has been considered as an important issue by many researchers in the field of hydrology and hydrogeology. Water quality is influenced by natural and anthropogenic effects including local climate, geology, irrigation practices and the use of water resources.

Materials and methods: Cheshmeh Kileh catchment is one of the most important basins in the west of Mazandaran province and has two main tributaries, Dohezar and Sehezar, which, after surveying mountainous areas, join in a plain area and form the Cheshmeh Kileh river. This catchment originates from Nosha Heights, northern heights of Alamut and Alam Kooch Glacier. According to the Meteorological Organization report, it has a humid climate with hot summers and slightly cold winters. The center of gravity and grading of the canals were determined using a Digital Elevation Model (DEM). Sampling points were determined based on the degree of waterway and possible terrestrial and anthropogenic pollutants. After sampling, the samples were sent to the laboratory to determine the concentration of the main anions and cations, Acidity, TDS, Conductivity and Alkalinity. To study the hydrogeochemical changes in the catchment area, Piper, Durov, Stiff, Schoeller and radial Plot diagrams were drawn in AqQA software and Gibbs diagram and role index diagram were drawn in Excel. Then the process of hydrochemical evolution, type and hydrochemical facies of water were determined and the hydrogeochemical control mechanism was investigated.

Results and discussion: The two sub-basins of rivers Dohezar and Sehezar have different chemical compositions of water at the source, which are influenced by the lithology of the region in their path, and finally, by joining together, the water type has evolved as bicarbonate-calcium. In the meantime, the sample that originates from the landfill effluent (CH16) also flows into this river, but due to the high volume of water flowing in the river, it does not have a significant effect on the overall water quality downstream. According to the Gibbs diagram, the main factor controlling water chemistry in the Cheshmeh Kileh catchment is the chemical weathering of the minerals that make up the rocks, and only in the CH16 sample (landfill) was the anthropogenic factor effective. Also, with the help of the roll index, it was found that saline seawater or trapped fossil saline water did not affect the composition of ions in the surface water of this catchment. With the help of the models provided for the Stiff diagram by Hounslow, the origin of water in CH1 sample was determined from gypsum lithology and other samples were mostly from limestone lithology. The presence of gypsum interlayers in the structure of Karaj Formation upstream of CH1 station in Maran village can be a proof of this analysis. Based on the relationship between origin and water composition, the origin of some stations was identified from the dissolution of evaporative rocks and others due to dewatering of silicates.

Conclusion: In general, it can be concluded that the chemical composition of water in Cheshmeh Kileh catchment has been affected by dissolution and oxidation of calcites and sulfides, as well as oxidation and weathering of silicates and sulfides.

Keywords: Dissolution, Hydrogeochemical evolution, Cheshmeh Kileh, Catchment, AqQA.

Citation: Nikoo Shiroud Issa, Alireza Ganji, Ali Moghimi Kandelous, Saeid Hakimi Asiabar (2023). Hydrogeochemical assessment of Cheshmeh Kileh catchment, *Res. Earth. Sci.* 14(4), (17-33) DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103509

* Corresponding author E-mail address: arganji@liau.ac.ir



ارزیابی هیدروژئوشیمیایی حوضه آبریز چشمه کیله با استفاده از نرم افزارهای ArcGIS و AqQA،

مقایسه موردی دو زیرحوضه دوهزار و سه هزار

نیکو شیرووعیسی^۱، علیرضا گنجی^{۱*} , علی مقیمی کندلوس^۱، سعید حکیمی آسیابر^۱

۱- گروه زمین شناسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

چکیده گسترده

مقدمه: رودخانه‌ها برای جوامع حیاتی هستند، زیرا آب شیرین برای کشاورزی، نیازهای انسانی و زیرساخت‌های لازم برای صنعت و حمل و نقل را فراهم می‌کنند. از این رو ارزیابی کیفیت آب به عنوان یک مسئله مهم مورد توجه بسیاری از محققان حوزه هیدرولوژی و هیدروژئولوژی قرار گرفته است. کیفیت آب تحت تأثیر اثرات طبیعی و فعالیت‌های انسانی از جمله آب و هوای ناحیه، زمین‌شناسی منطقه و فعالیت‌های آبیاری و نحوه استفاده از منابع آبی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها: حوضه آبریز چشمه کیله از مهم‌ترین حوضه‌های غرب استان مازندران و دارای دو شاخه اصلی با نام رودخانه‌های دوهزار و سه هزار است که بعد از پیمایش مناطق کوهستانی، در منطقه جلگه‌ای به هم می‌پیوندند و رودخانه چشمه کیله را شکل می‌دهند. این حوضه آبریز از ارتفاعات نوشا، ارتفاعات شمالی الموت و یخچال علم کوه سرچشمه می‌گیرد. براساس گزارش سازمان هواشناسی دارای اقلیم مرطوب با تابستان گرم و زمستان کمی سرد است. به کمک مدل رقومی ارتفاع (DEM) مرکز ثقل و درجه‌بندی آبراهه‌ها تعیین شد. نقاط نمونه‌برداری براساس درجه آبراهه و آلاینده‌های احتمالی زمین زاد و انسان زاد مشخص گردید. پس از نمونه برداری نمونه‌ها جهت تعیین غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی، اسیدیته، کل مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی و قلیائیت به آزمایشگاه ارسال گردید. برای بررسی تغییرات هیدروژئوشیمیایی در سطح حوضه آبریز نمودارهای پایپر، دیورو، استیف، شولر و شعاعی در نرم‌افزار AqQA و نمودار گیبس و نمودار شاخص رول در محیط Excel رسم گردید. سپس روند تکامل هیدروژئوشیمیایی، تیپ و رخساره هیدروژئوشیمیایی آب تعیین و مکانیسم کنترل کننده هیدروژئوشیمیایی بررسی شد.

نتایج و بحث: دو زیرحوضه رودخانه‌های دوهزار و سه هزار در سرمنشأ دارای ترکیب شیمیایی آب مختلف هستند که در مسیر خود تحت تأثیر لیتولوژی منطقه قرار می‌گیرند و در نهایت با پیوستن به هم، تیپ آب به صورت بی کربنات-کلسیک تکامل یافته است. در این میان نمونه‌ای که از پساب محل دفن زباله منشأ می‌گیرد نیز به این رودخانه می‌ریزد، لیکن به دلیل حجم بالای آب جاری در رودخانه تأثیر شاخصی بر کیفیت کلی آب در پایین دست ندارد. بر طبق نمودار گیبس عامل اصلی کنترل کننده شیمی آب در حوضه آبریز چشمه کیله، هوازدگی شیمیایی کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها است و فقط در نمونه CH16 (محل دفن زباله) عامل انسان زاد مؤثر بوده است. همچنین به کمک شاخص رول مشخص شد که آب شور دریا و یا آب شور محبوس فسیلی بر ترکیب یون‌های موجود در آب سطحی این حوضه مؤثر نبوده‌اند. به کمک الگوهای ارائه شده برای نمودار استیف توسط هانسلو، منشأ آب‌ها در نمونه CHI از لیتولوژی ژیبس و سایر نمونه‌ها غالباً از لیتولوژی سنگ آهک مشخص گردید. وجود میان لایه‌های ژیبس در ساختار سازند کرج در بالادست ایستگاه CHI در روستای مران می‌تواند شاهی بر این تحلیل باشد. براساس رابطه بین خاستگاه و ترکیب آب، خاستگاه برخی از ایستگاه‌ها از انحلال سنگ‌های تبخیری و برخی دیگر ناشی از آگیری سیلیکات‌ها تشخیص داده شد.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب شیمیایی آب در حوضه آبریز چشمه کیله متأثر از انحلال و اکسیداسیون کلسیت‌ها و سولفیدها و همچنین اکسیداسیون و هوازدگی سیلیکات‌ها و سولفیدها بوده‌اند.

واژگان کلیدی: انحلال، تکامل هیدروژئوشیمیایی، چشمه کیله، حوضه آبریز، AqQa.

استناد: نیکو شیرووعیسی، علیرضا گنجی، علی مقیمی کندلوس، سعید حکیمی آسیابر (۱۴۰۲). ارزیابی هیدروژئوشیمیایی حوضه آبریز چشمه کیله،

پژوهشهای دانش زمین: ۱۴ (۴)، (۳۳-۱۷)، DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103509

مقدمه

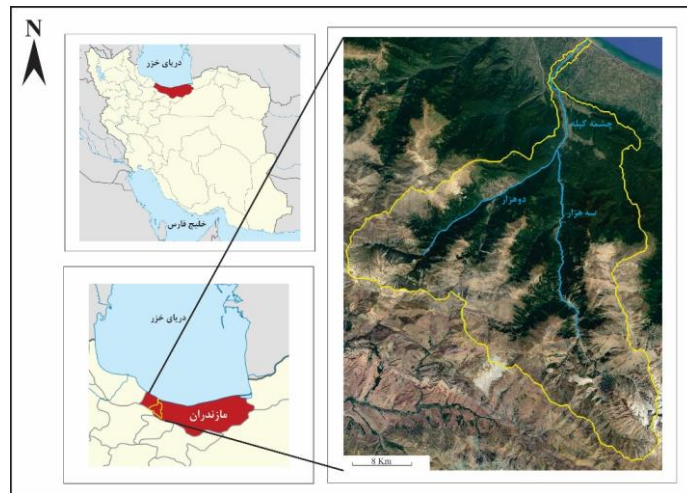
رودخانه‌ها برای جوامع حیاتی هستند، زیرا آب شیرین برای کشاورزی، نیازهای انسانی و زیرساخت‌های لازم برای صنعت و حمل و نقل را فراهم می‌کنند (Yotova et al, 2020; Singh et al, 2021). اکوسیستم‌های رودخانه نقش مهمی در تنظیم محیط زیست، انتقال مواد مغذی، جذب زباله‌های شهری و صنعتی و کنترل سیل و خشکسالی ایفا می‌کنند. بسیاری از این عملکردها به‌طور جدایی ناپذیری با شاخص‌های سلامت رودخانه مانند کیفیت آب، وضعیت اکولوژیکی و جریان مرتبط هستند (Tharmar et al, 2022). آلودگی رودخانه‌ها، تبدیل به یکی از مهمترین مشکلات دنیای امروز به ویژه کشورهای در حال توسعه شده است، زیرا با گذشت زمان و گسترش جوامع انسانی و به تبع آن افزایش استفاده از منابع آبی برای مصارف مختلف همچون کشاورزی و صنعتی دخل و تصرف غیرطبیعی و تغییر شرایط کیفی آب رودخانه‌ها افزایش یافته است. (ماه‌رویان و همکاران، ۱۳۹۹). از این‌رو ارزیابی کیفیت آب به عنوان یک مسئله مهم مورد توجه بسیاری از محققان حوزه هیدرولوژی و هیدروژئولوژی قرار گرفته است. کیفیت آب تحت تأثیر اثرات طبیعی و فعالیت‌های انسانی از جمله آب و هوای ناحیه، زمین‌شناسی منطقه و فعالیت‌های آبیاری و نحوه استفاده از منابع آبی قرار می‌گیرد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۹). در طی سال‌های گذشته تحقیقات گسترده‌ای در خصوص هیدروژئوشیمی آب‌های سطحی و روند تغییرات آن در طول حوضه آبریز انجام شده است. به عنوان مثال قره‌محمودلو و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی تکامل هیدروژئوشیمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگان‌رود را مورد بررسی قرار دادند. آنها معتقد بودند که بررسی تکامل هیدروژئوشیمیایی^۱ و روند تغییرات منابع آبی می‌تواند اطلاعات مفیدی در زمینه تأثیر سازندهای تغذیه-کننده و در برگیرنده منابع آبی، مسیر جریان آب و نواحی تبخیر در اختیار قرار دهد. نتایج نشان داد که واکنش آب سنگ، تبخیر و نفوذ آب شور دریای خزر از مهمترین عوامل کنترل‌کننده شیمی آب رودخانه گرگان‌رود هستند. صفری و همکاران (Safari et al, 2020) طی پژوهشی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی و کیفیت آب رودخانه آجی چای، شرق دریاچه ارومیه را بررسی و تأثیرات سازندهای زمین‌شناسی را بر روی روند تکاملی این رودخانه را شرح دادند. براساس

نتایج، نمونه‌ها در بالادست رودخانه آجی چای دارای تیپ بی‌کربنات کلسیک بوده و در پایین‌دست در اثر تأثیر لیتولوژی سازندها مثل انحلال کانی هالیت و افزایش یون-های سدیم و کلر تیپ آب به کلرید سدیک تغییر می‌یابد. محمدی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی به ارزیابی هیدروژئوشیمیایی منابع آب دریاچه سد جره با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره و روش‌های هیدروژئوشیمیایی پرداختند. آنها با نمونه‌برداری از آب‌های سطحی منتهی به دریاچه سد جره و با کمک بررسی شاخص‌های اشباع، نسبت‌های یونی، نمودار گیبس و همچنین نتایج حاصل از تکنیک‌های آماری چند متغیره دریافتند که انحلال و فرسایش رسوبات حاصل از سازند گچساران عامل اصلی نامطلوب شدن کیفیت آب دریاچه سد جره در بخش جنوب شرقی (خروجی یا دهانه سد) شده است. همچنین ریچاردز و همکاران (Richards et al, 2022) در بررسی دینامیک هیدروژئوشیمیایی رودخانه گنگ هندوستان دریافتند که عواملی مانند رقیق‌سازی، تبخیر، برهم‌کنش‌های آب و سنگ (از جمله هوازگی کربنات و سیلیکات) و ورودی‌های انسانی از جمله عوامل اصلی تعیین‌کننده شیمی آب رودخانه گنگ هستند. همچنین جوانبخت و همکاران (۱۳۹۹) و عرفانیان و همکاران (Erfanian et al, 2020) در طی پژوهش‌های خود متذکر شده‌اند که شیمی اولیه آب متأثر از هوازگی شیمیایی سنگ‌های سطحی حوضه آبریز و نوع لیتولوژی سنگ‌ها و رسوبات است. از این رو در این پژوهش به بررسی هیدروژئوشیمی حوضه آبریز چشمه کیله می‌پردازیم. رودخانه چشمه کیله^۲ یکی از مهمترین رودخانه‌های غرب استان مازندران در شمال ایران می‌باشد که با عبور از مناطق کوهستانی، جنگلی، زمین‌های کشاورزی و ناحیه مسکونی شهرستان تنکابن، به دریای خزر ختم می‌شود. انجام مطالعات جامع جهت تعیین عوامل مؤثر در ترکیبات شیمیایی آب و روند تغییرات کیفی آب سطحی در طول مسیر حرکت رودخانه می‌تواند به شناسایی آلاینده‌ها و عوامل کنترل‌کننده شیمی آب و توسعه پایدار رودخانه کمک شایانی کند. هدف کلی این پژوهش با بکارگیری روش‌های هیدروژئوشیمیایی و استفاده از پردازش نرم افزاری برای تعیین عوامل مؤثر بر کیفیت آب سطحی و رسم نمودارهای مختلف برای حوضه آبریز رودخانه چشمه کیله محقق می‌گردد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز چشمه کیله یکی از مهمترین حوضه‌های غرب استان مازندران و در بین عرض‌های $36^{\circ}20'$ و $36^{\circ}50'$ شمالی و در بین طول‌های $50^{\circ}32'$ و $50^{\circ}58'$ شرقی قرار دارد و شامل مساحتی حدود ۹۲۲ کیلومتر مربع می‌باشد و در تمام فصول سال دارای آب فراوان بوده است.

این رودخانه در بخش جنوبی دریای خزر به عنوان یک زیستگاه بسیار مهم و با ارزش برای مهاجرت و زادآوری گونه‌های با ارزش شیلاتی نظیر ماهی آزاد^۳ و ماهی سفید^۴ از اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده است (عباسپور و همکاران، ۱۳۹۰) (شکل ۱).



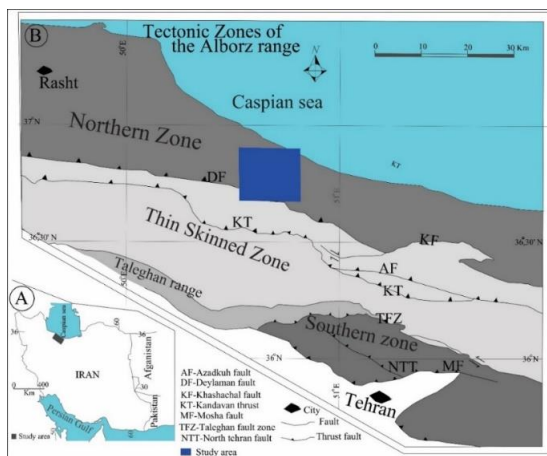
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز چشمه کیله

و در زیرزون البرز شمالی^۷ واقع شده است (شکل ۲). راستای عمومی ساختمان‌های زمین‌شناسی منطقه، شمال-باختر - جنوب خاور بوده و به وسیله انبوهی از گسلش‌ها (از نوع راندگی) و چین‌خوردگی‌ها به وجود آمده‌اند. تراکم سامانه‌های گسله و چین‌خوردگی باعث شده‌اند که در فاصله‌ای نسبتاً کوتاه (حدود ۲۵ کیلومتر) اختلاف ارتفاعی بیش از ۴ کیلومتر پدید آید (بهارفیروزی و همکاران، ۱۳۷۹). سازندهای کرج، تیزکوه، شمشک، الیکا، روته، نسن، درود، مبارک، میلا، واحدهای معادل لالون و کهر، زاگون، باروت و دولومیت سلطانیه در این حوضه آبریز گزارش شده‌اند (شکل ۳). در این حوضه آبریز ذخایر معدنی پیریت، باریت، مس، روی، زغال سنگ، سنگ جوش، سیلیس و آهن ثبت شده‌اند (بهارفیروزی و همکاران، ۱۳۷۹). همچنین در شاخه فرعی سه‌هزار ۳ معدن شن و ماسه فعال و در شاخه اصلی (چشمه کیله) ۲ معدن شن و ماسه فعال فعالیت دارند. همچنین مرکز دفن زباله‌های شهرهای تنکابن و شیرود در این حوضه آبریز قرار دارد که پساب آن پس از طی مسیر در نهایت به رودخانه چشمه کیله می‌ریزد.

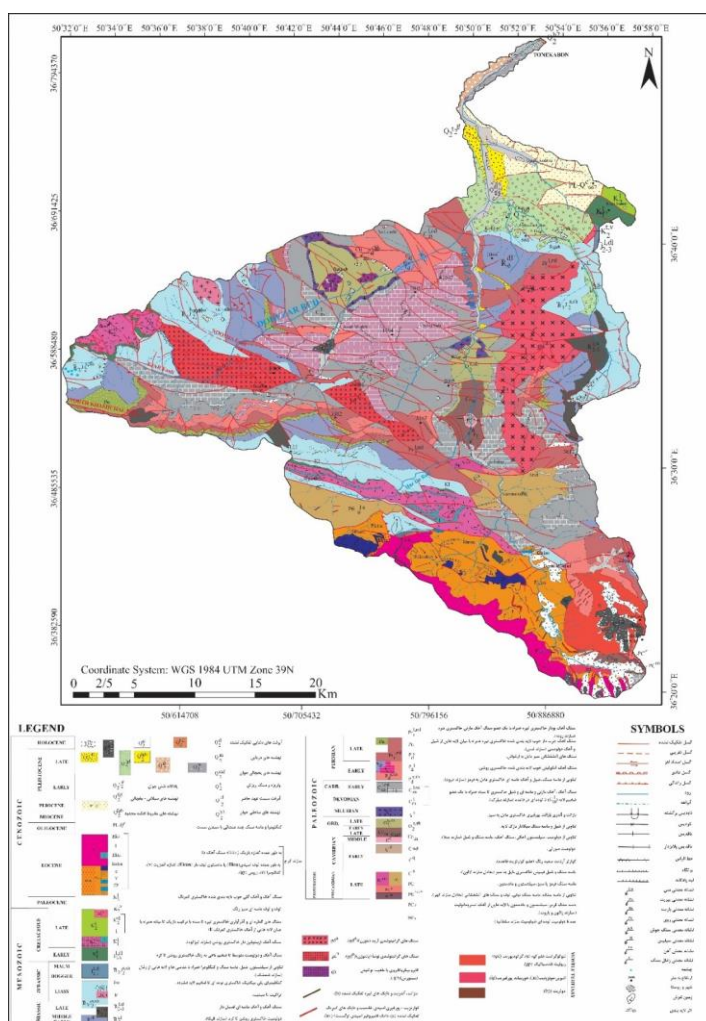
رودخانه چشمه کیله دارای دو شاخه اصلی با نام رودخانه‌های دوهزار^۵ و سه‌هزار^۶ است که شاخه رودخانه دوهزار از ییلاقات نوشا و ارتفاعات شمالی الموت و شاخه رودخانه سه‌هزار از یخچال قله علم کوه سرچشمه می‌گیرد. این دو رودخانه بعد از پیمایش مناطق کوهستانی، در منطقه جلگه‌ای به هم می‌پیوندند و رودخانه چشمه کیله را شکل می‌دهند (شکل ۱). در انتها رودخانه چشمه کیله از میان شهرستان تنکابن عبور کرده و به دریای خزر می‌ریزد. براساس گزارش سازمان هواشناسی (ایستگاه سینوپتیک نوشهر)، در دوره آماری ۱۳۵۷-۱۳۹۵ مجموع بارش سالانه، $1290/8$ میلی‌متر، تعداد روزهای بارانی ۱۳۲ روز، میانگین دمای سالانه $16/4$ درجه سانتیگراد، بیشینه مطلق دما $36/6$ درجه سانتیگراد، کمینه مطلق دما $-5/2$ درجه سانتیگراد، مجموع تعداد روزهای یخبندان ۵ روز، میانگین رطوبت نسبی سالانه ۸۱ درصد و نوع اقلیم مرطوب با تابستان گرم و زمستان کمی سرد است.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

طبق تقسیم‌بندی گست و همکاران (Guest et al, 2006) منطقه مورد مطالعه از لحاظ ساختاری در زون البرز مرکزی



شکل ۲: موقعیت منطقه مورد مطالعه در البرز مرکزی (حکیمی آسیابر، ۱۳۹۷؛ Guest et al, 2006).



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز رودخانه چشمه‌کیله (بهار فیروزی و همکاران، ۱۳۷۹؛ Annells et al, 1959).

مواد و روش‌ها

به منظور نمونه‌برداری از آبراهه‌ها و رودخانه‌های اصلی و فرعی منطقه مورد مطالعه ابتدا خط تقسیم حوضه آبریز چشمه‌کیله تعیین گردید. بدین منظور از نرم‌افزارهای

SASPlanet^۱، Global Mapper^۲ و Google Earth^۳ استفاده گردید. سپس جهت تعیین مرکز ثقل و درجه‌بندی آبراهه‌ها، ابتدا فایل kml محدوده مطالعاتی تولید شده توسط نرم افزار Google Earth، در نرم افزار Global

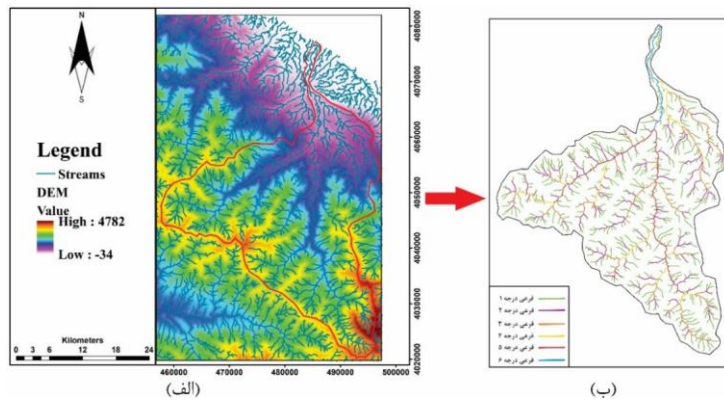
است که تا حد ممکن آن را از نظر توپولوژیکی به دو نیمه مساوی تقسیم کند. معمولاً مرکز ثقل یک شبکه آبراهه‌ای را می‌توان با استفاده از فرمول رابطه ۱ محاسبه کرد.

رابطه (۱)

$$M_c = (M_0 + 1) / 2$$

که M_c شماره نسبت داده شده به آبراهه مرکز ثقل و M_0 شماره آبراهه خروجی حوضه آبریز است (حسبی پاک، ۱۳۷۱؛ یزدی، ۱۳۸۱). سپس شبکه آبراهه‌ها درجه‌بندی و درجه شاخه‌های آبراهه‌ها در حوضه آبریز چشمه کیله تعیین گردید (M_0) (شکل ۴ ب).

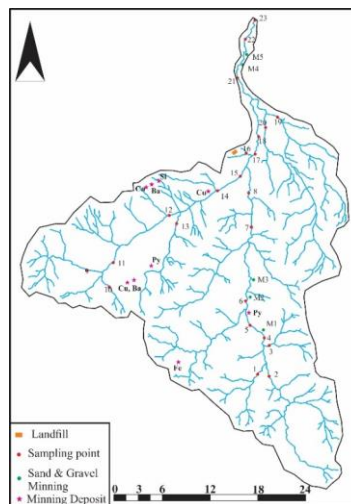
Mapper اجرا گردید و به صورت شیپ فایل^{۱۱} خروجی گرفته شد. سپس فایل DEM^{۱۲} ASTER Global^{۱۳} از سایت USGS^{۱۴} دانلود و به همراه شیپ فایل محدوده مطالعاتی در نرم افزار ArcMAP^{۱۵} فراخوان گردید. سپس به کمک نوار ابزار Arc Hydro Tools (جهت تعیین جریان و تراکم جریان) و به کمک ابزار Spatial Analyst Tools (درجه‌بندی آبراهه به روش استرال^{۱۶}) شبکه آبراهه‌ای حوضه آبریز چشمه کیله طراحی شد (شکل ۴ الف). در ادامه جهت طراحی شبکه نمونه‌برداری بهینه برای حصول نتیجه مطلوب، براساس روش استرال مرکز ثقل آبراهه تعیین گردید. مرکز ثقل یک شبکه آبراهه‌ای عبارت از آبراهه‌ای



شکل ۴: الف: تصویر DEM تهیه شده از داده‌های ماهواره‌ای از سنجنده ASTER. ب: سیستم آبراهه‌های فرعی حوضه آبریز چشمه کیله.

احتمالی آلودگی زمین‌زاد، نقاطی به شبکه نمونه‌برداری اضافه و بدین ترتیب ۲۳ نقطه جهت نمونه‌برداری انتخاب شد (شکل ۵). لیکن در زمان نمونه‌برداری با توجه به صعب‌العبور بودن برخی از نقاط مشخص شده و عدم دسترسی، در مجموع از ۲۰ ایستگاه نمونه‌برداری گردید.

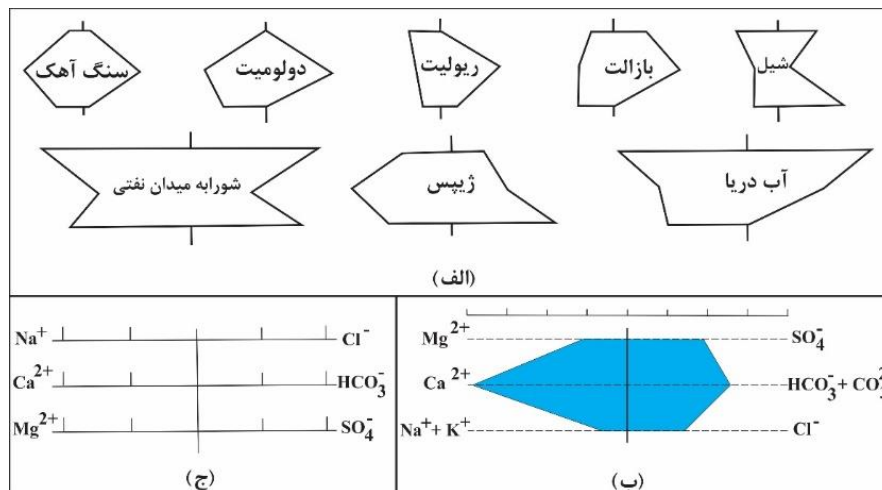
با توجه به اینکه ۶ درجه آبراهه در حوضه آبریز چشمه کیله به روش استرال مشخص گردید، آبراهه مرکز ثقل درجه ۳/۵ است. لذا نقاطی به عنوان محل نمونه‌برداری مشخص شدند که در آبراهه‌های درجه ۳، ۴، ۵ و ۶ قرار دارند. همچنین براساس موقعیت نقاط آلاینده انسان‌زاد و نقاط



شکل ۵: موقعیت نقاط نمونه‌برداری در حوضه آبریز چشمه کیله.

همچنین جهت تهیه نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز چشمه کیله، با توجه به اینکه حوضه آبریز در بخش مرکزی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی رامسر و بخش کوچکی از شمال خاوری ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی شکران قرار می‌گیرد، جهت همسان‌سازی لیتولوژی و یکپارچه‌سازی راهنمای نقشه، به کمک نرم‌افزار ArcGIS نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز چشمه کیله بازطراحی گردید (شکل ۳). نمونه‌برداری در شهریور ۱۴۰۰، در یک مرحله انجام شده است. برای نمونه‌برداری از آب جاری در بستر آبراهه‌ها و رودخانه‌های حوضه آبریز چشمه کیله، از ظروف پلی‌اتیلن استفاده شد. بدین منظور یک بطری پلی‌اتیلن جهت اندازه‌گیری کاتیون‌ها و یک بطری پلی‌اتیلن جهت اندازه‌گیری آنیون‌ها و سایر پارامترهای شیمیایی در نظر گرفته شد. در هر ایستگاه قبل از برداشت نمونه، بطری نمونه‌برداری با نمونه آب رودخانه سه مرتبه شستشو گردید. نمونه‌های مربوط به اندازه‌گیری کاتیون در محل نمونه‌برداری براساس استاندارد انجمن بهداشت عمومی آمریکا (APHA) ۱۷ و دستورالعمل آزمایشگاه از فیلتر ۴۵ میکرون عبور داده شده و سپس با استفاده از اسید نیتریک ۶۵ درصد به اسیدیته کمتر از ۲ رسانده شد (Rice et al, 2012; Richards et al, 2022). نمونه‌ها با فاصله زمانی ۲۴ ساعت پس از نمونه

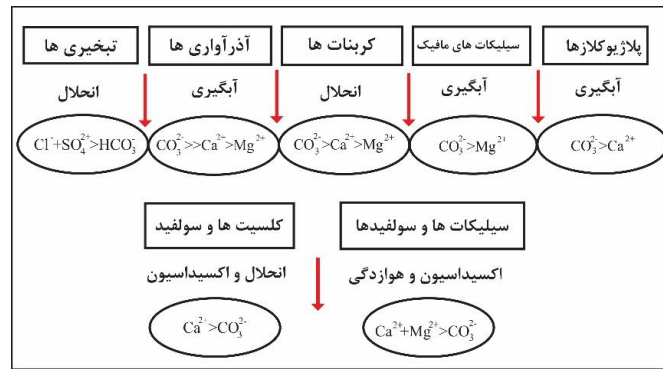
برداری به شرکت مطالعات مواد معدنی زرآما (تهران) منتقل گردید و آزمایش‌های ICP-MS (کاتیون‌ها)، نیترات، سولفات، کربنات، بی‌کربنات، کلرید، اسیدیته، کل مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی و قلیانیت بر روی نمونه‌های ارسالی انجام شد. برای بررسی تحولات هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های آب برداشت شده، از نرم‌افزار AqQA^{۱۸} استفاده شد و نمودارهای پایپر^{۱۹}، دیوروف^{۲۰}، استیف^{۲۱}، شولر^{۲۲} و شعاعی^{۲۳} رسم و نتایج آنالیز نرم‌افزاری مورد نیاز ایجاد شدند. سپس روند تکامل هیدروشیمیایی، تیپ و رخساره هیدروشیمیایی آب تعیین و مکانیسم کنترل‌کننده هیدروژئوشیمیایی بررسی شد. همچنین نمودار گیبس^{۲۴} و نمودار شاخص رول^{۲۵} در محیط Excel^{۲۶} رسم گردید. در ترسیم نمودار استیف از الگوهای ارائه شده توسط هانسلو (Hounslow, 1995) (شکل ۶ الف) جهت تفسیر استفاده شده است. با توجه به اینکه جانمایی کاتیون‌ها و آنیون‌ها در الگوهای هانسلو (شکل ۶ ج) و نمودار استیف ترسیم شده توسط نرم‌افزار AqQA (شکل ۶ ب) با هم متفاوت هستند، به کمک نرم‌افزار گرافیکی CoreDRAW^{۲۷} نمودارهای استیف خروجی گرفته شده از نرم افزار AqQA براساس الگوهای هانسلو طراحی شده‌اند.



شکل ۶: الف: الگوهای ارائه شده توسط هانسلو، ب: نحوه قرارگیری کاتیون و آنیون در نمودار استیف توسط نرم افزار AqQA، ج: نحوه قرارگیری کاتیون و آنیون در نمودار استیف ارائه شده توسط هانسلو.

آب استفاده و در بخش بحث و نتایج روابط تعیین‌کننده شیمی آب در شکل ۱۴ مشخص گردید.

همچنین جونز و دئوکامپو (Jones and Deocampo, 2014) جهت تعیین منشأ شیمیایی روابطی را در کتاب خود ارائه داده اند (شکل ۷). از این روابط نیز جهت تعیین خاستگاه



شکل ۷: رابطه بین خاستگاه و ترکیب آب (Jones and Deocampo, 2014).

بحث و نتایج

دو رودخانه فرعی دوهزار و سه هزار از مناطق مختلفی منشأ می‌گیرند. ایستگاه‌های CH1 تا CH8 در حوضه آبریز رودخانه سه هزار، دربردارنده لیتولوژی غالب رسوبی و همچنین متأثر از آثار معدنی آهن و پیریت (منابع احتمالی آلاینده زمین زاد) و سه معدن شن و ماسه فعال (منابع احتمالی آلاینده انسان زاد) بوده؛ و ایستگاه‌های CH12 تا CH15 در حوضه آبریز رودخانه دوهزار و شامل لیتولوژی غالب رسوبی و آذرین و متأثر از آثار معدنی مس، باریت،

سیلیس و پیریت است. از پیوستن دو زیرحوضه دوهزار و سه هزار رودخانه چشمه کیله شکل می‌گیرد که ایستگاه‌های CH16 تا CH23 بر روی این رودخانه نمونه‌گیری شده است. قابل ذکر است که پساب مرکز دفن زباله‌های شهرستان تنکابن نیز به رودخانه چشمه کیله می‌ریزد. همچنین در پایین دست رودخانه چشمه کیله دو معدن شن ماسه فعالیت دارند. تمامی این منابع آلاینده می‌توانند در کیفیت هیدروژئوشیمیایی آب رودخانه در طی مسیر خود مؤثر باشند.

جدول ۱: نتایج آنالیز نمونه‌های آب سطحی برداشت شده از حوضه آبریز چشمه کیله

Element	SO ₄ ²⁻	Alkalinity	NO ₃ ²⁻	pH	EC	TDS	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Unit	mg/l	ppm	ppm	-	μS	ppm	ppm	ppm	ppm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Method	STM	ENV-02-out	ENV-02-out	-	Env-01	Env-01	Env-01	Env-01	MMS-01	MMS-01	MMS-01	MMS-01	MMS-01
	1129												
CH1	410.86	155	3.22	8.77	862	603	53	30	187	208.48	2.41	18.7	24.94
CH2	66.91	90	3.48	8.82	324	207	53	15	117	60.78	1.55	9.25	7.85
CH3	50.43	158	2.79	8.25	377	241	45	19	211	59.76	2.63	21.98	3.3
CH4	97.66	110	3.1	8.88	418	268	53	21	126	73.42	1.93	12.2	11.12
CH5	94.74	115	2.87	8.8	407	260	53	30	127	76.17	1.94	12.23	11.22
CH6	82.92	138	1.99	8.49	416	266	45	34	155	72	1.83	13.36	13.55
CH7	81.71	130	2.73	8.3	402	257	45	25	145	70.91	1.9	13.08	12.73
CH8	81.47	133	3.03	7.92	408	261	45	43	159	73.48	1.94	13.79	12.87
CH12	31.68	168	0.77	7.89	353	226	38	24	179	59.06	1	16.96	4.41
CH13	12.95	173	1.89	8.02	335	214	45	24	215	53.64	0.8	16.4	3.64
CH14	29.85	178	0.97	7.84	369	236	38	27	268	58.52	1.1	17.84	5.46
CH15	27.91	178	3.12	8.05	375	240	38	78	251	60.69	1.15	17.69	6
CH16	<5	1575	<0.1	8.53	3940	3152	211	0	4148	58.78	323.7	40.31	313.4
CH17	55.97	160	6.2	8.47	423	271	45	10	239	74.78	5.87	15.93	15.26
CH18	56.59	160	4.1	8.58	407	260	38	13	233	70.75	2.27	14.73	10.97
CH19	10.2	193	3.5	8.36	355	227	53	0	304	56.28	1.61	14.94	5.87
CH20	25.98	173	4.05	8.63	354	227	38	14	237	56.28	1.29	17.9	5.49
CH21	54.01	160	3.76	8.55	396	253	45	10	219	68.03	1.77	14.67	9.94
CH22	69.89	163	4.16	8.43	432	276	45	0	277	83.39	2.21	16.22	10.25
CH23	52.51	178	4.69	8.34	438	280	45	0	244	73.96	2.28	17.19	10.58
Min	<5	90	<0.1	7.84	324	207	38	0	117	53.64	0.8	9.25	3.3
Max	410.86	1575	6.2	8.88	3940	3152	211	78	4148	208	323.7	40.31	313.4
Mean	73.38	224.4	3.18	8.4	589.5	411.2	53.5	20.8	402.0	73.5	18.1	16.8	24.4

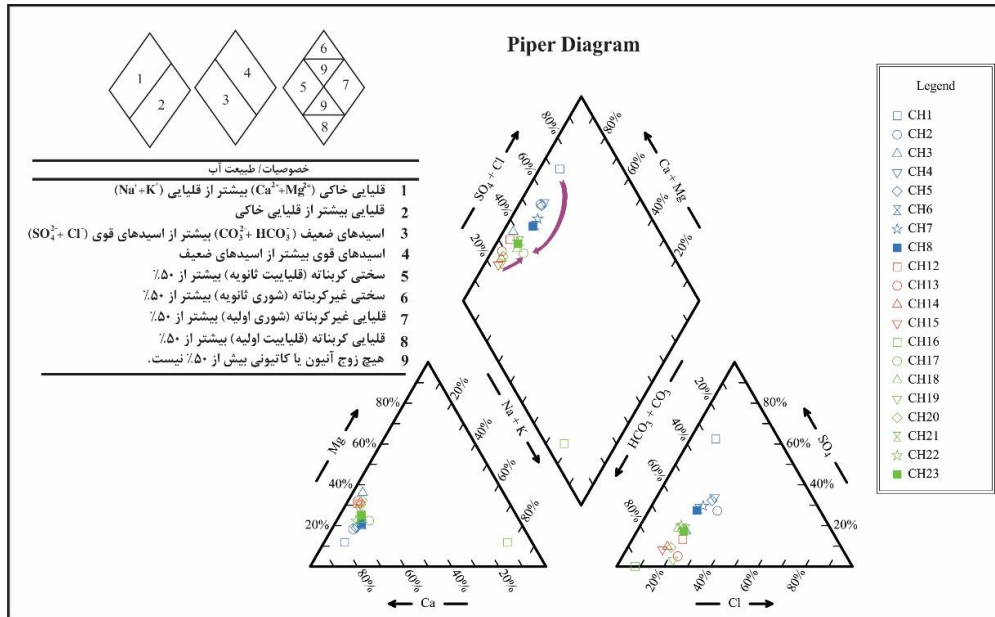
نتایج حاصل از آنالیز آزمایشگاهی در جدول بالا مشاهده می‌شود. طبق نتایج آنالیز (جدول ۱)، چهار کاتیون اصلی

شامل سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم اندازه‌گیری شدند که کمترین مقدار سدیم به میزان ۳/۳ mg/l در ایستگاه

مختلفی را نشان می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها میزان کاتیون های قلیایی خاکی (Ca^{2+} و Mg^{2+}) نسبت به کاتیون‌های قلیایی (Na^+ و K^+) غالب است. اسیدهای قوی (SO_4^{2-} + Cl^-) در برابر اسیدهای ضعیف (CO_3^{2-} + HCO_3^-) در ۵ نمونه از رودخانه فرعی سه‌هزار (CH1- CH2- CH4- CH5- CH7) برتری و در سایر نمونه‌ها اسیدهای ضعیف بر اسیدهای قوی غلبه دارند. در بررسی روند تکامل در حوضه آبریز چشمه‌کیله؛ رودخانه فرعی سه‌هزار از به هم پیوستن رودخانه‌های مران و درجان (نمونه‌های CH1 و CH2) شروع می‌شود و سپس رودخانه فرعی دیگری (نمونه CH3) به آن می‌ریزد. در هر سه نمونه کاتیون کلسیم و منیزیم (قلیایی خاکی) غالب است، اما در نمونه‌های CH1 و CH2 اسیدهای قوی و در نمونه CH3 اسیدهای ضعیف غالب هستند. در ادامه کیفیت هیدروشیمیایی نمونه‌های CH4 تا CH8 ترکیبی از سه نمونه بالادست (ترکیبی از سه فرعی CH1، CH2 و CH3) را نشان می‌دهند. نمونه CH1 دارای تیپ سولفات-کلسیک است که ناشی از لیتولوژی ژیبس در ساختار سازند کرج می‌باشد. این لیتولوژی در بالادست این ایستگاه (در روستای مران) قابل مشاهده است. سایر نمونه‌ها در رودخانه فرعی سه‌هزار دارای تیپ بی‌کربنات-کلسیک هستند که مرتبط به غالب بودن لیتولوژی سنگ آهک در این زیرحوضه می‌باشد. در رودخانه فرعی دوهزار در تمامی نمونه‌ها، کاتیون‌های قلیایی خاکی بر قلیایی‌ها و اسیدهای ضعیف بر اسیدهای قوی غلبه دارند و سختی کربنات (قلیایی ثانویه) بیشتر از ۵۰٪ و همچنین نمونه‌ها دارای تیپ بی‌کربنات-کلسیک هستند. بعد از ایستگاه نمونه- برداری CH8 (سه‌هزار) و CH15 (دوهزار) دو رودخانه فرعی دوهزار و سه‌هزار به هم می‌پیوندند و نمونه‌های CH16 تا CH23 بر روی رودخانه چشمه‌کیله نمونه‌برداری شده‌اند. با توجه به اینکه نمونه CH16، از پساب مرکز دفن زباله شهرستان تنکابن گرفته شده، کمترین تأثیرپذیری از ساختارهای زمین‌زاد منطقه را داشته و از لحاظ ترکیب هیدروژئوشیمیایی با تمامی نمونه‌های حوضه آبریز چشمه-کیله متفاوت و دارای تیپ بی‌کربنات-سدیک است. نمونه‌های بعدی نمایانگر تلفیقی از دو رودخانه فرعی و در مجموع دارای تیپ بی‌کربنات-کلسیک هستند.

CH3 و بیشترین مقدار در ایستگاه CH16 با $313/4 \text{ mg/l}$ ؛ کمترین غلظت پتاسیم در ایستگاه CH13 با مقدار mg/l و $0/8$ و بیشترین غلظت با $323/7 \text{ mg/l}$ در ایستگاه CH16؛ کمترین مقدار منیزیم با $9/25 \text{ mg/l}$ در ایستگاه CH2 و بیشترین مقدار با $40/31 \text{ mg/l}$ در ایستگاه CH16؛ کمترین غلظت کلسیم با مقدار $53/64 \text{ mg/l}$ در ایستگاه CH13 و بیشترین غلظت با مقدار $208/48 \text{ mg/l}$ در ایستگاه CH1 ثابت گردید. همچنین آنیون‌های اصلی شامل سولفات، نیترات، کلرید، کربنات و بی‌کربنات آنالیز شدند که کمترین غلظت سولفات در ایستگاه CH16 با مقدار 5 mg/l و بیشترین غلظت در ایستگاه CH1 با مقدار $410/86 \text{ mg/l}$ ؛ کمترین غلظت نیترات با مقدار $0/1 \text{ ppm}$ در ایستگاه CH16 و بیشترین غلظت با مقدار $6/2 \text{ ppm}$ در ایستگاه CH17؛ کمترین غلظت کلرید در ایستگاه‌های CH12، CH14، CH15، CH18 و CH20 با مقدار 38 ppm و بیشترین غلظت در ایستگاه CH16 با مقدار 211 ppm ؛ کمترین غلظت کربنات با مقدار 0 ppm در ایستگاه‌های CH16، CH19، CH22 و CH23 و بیشترین غلظت در ایستگاه CH15 با مقدار 78 ppm ؛ کمترین غلظت بی-کربنات در ایستگاه CH2 با مقدار 117 ppm و بیشترین غلظت در ایستگاه CH16 با مقدار 4148 ppm گزارش شده‌اند. کمترین غلظت پارامتر قلیائیت در ایستگاه CH2 با مقدار 90 ppm و بیشترین غلظت با مقدار 1575 ppm در ایستگاه CH16؛ کمترین عدد ثبت شده در پارامتر $7/84 = \text{pH}$ در ایستگاه CH14 و بیشترین در ایستگاه CH4 با $\text{pH} = 8/88$ ؛ کمترین هدایت الکتریکی در ایستگاه CH2 با مقدار $342 \mu\text{s}$ و بیشترین در ایستگاه CH16 با مقدار $3940 \mu\text{s}$ ؛ کمترین مقدار کل مواد جامد محلول با مقدار ppm و 207 در ایستگاه CH2 و کمترین مقدار در ایستگاه CH16 با مقدار 3152 ppm ثبت شده‌اند.

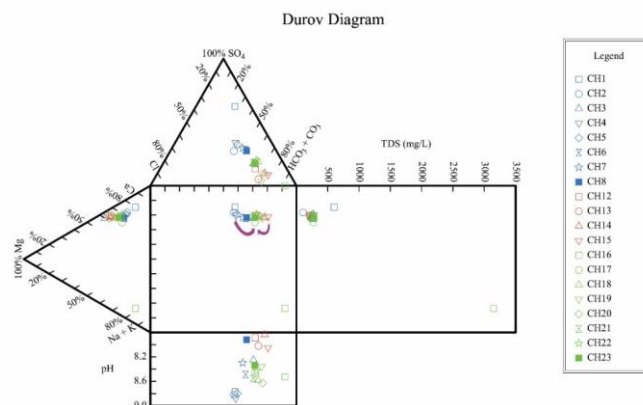
بررسی روند تکامل هیدروشیمیایی و تیپ و رخساره آب
سینگ و همکاران (Singh et al, 2013) معتقدند که با ترسیم داده‌های ژئوشیمیایی نمودار سه خطی پایپر (Piper, 1944)، می‌توان تکامل ژئوشیمیایی آب و ارتباط بین یون‌های محلول مختلف را درک کرد. شکل ۷ جانمایی داده‌های ژئوشیمیایی در حوضه آبریز چشمه‌کیله در نقاط



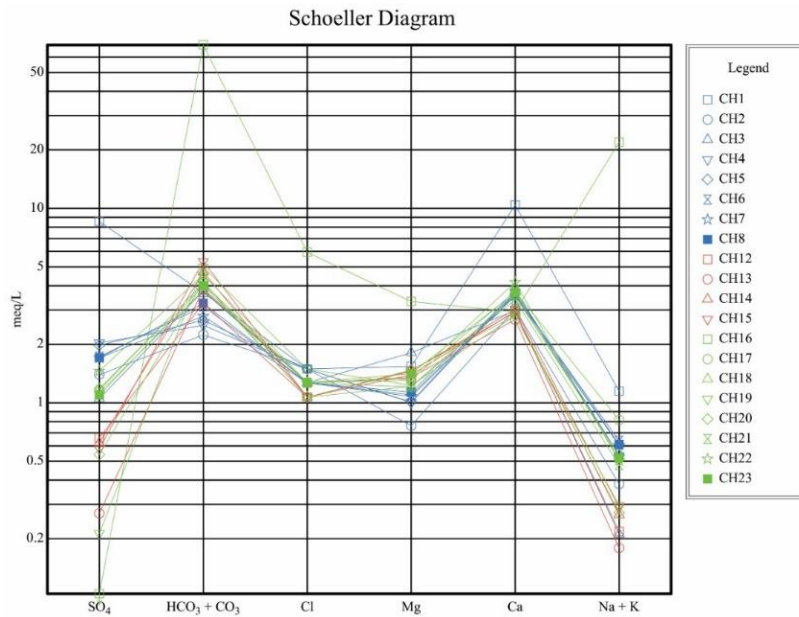
شکل ۸: نمودار پایپر نمونه‌های برداشت شده از حوضه آبریز چشمه کیله (Piper, 1944; Singh et al, 2013).

CH1 نیز TDS و سولفات بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. به طور کلی نمودار دوروف نیز همانند نمودار پایپر، روند تکاملی در دو رودخانه فرعی دوهزار و سه هزار و سپس اقدام در رودخانه چشمه کیله را تأیید می‌کند. تلبی (Talabi, 2017) بر این عقیده است که می‌توان مواد اصلی تشکیل دهنده یونی آب‌ها (CO_3^{2-} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^{+} و K^{+}) در هر منطقه مورد مطالعه را به صورت میلی‌اکی والان بر لیتر محلول (meq/l) بر روی نمودار شولر ترسیم کرد. به عقیده او نمودار شولر، نمودار نیمه لگاریتمی است که غلظت‌های هر یون در هر نمونه با نقاطی در شش خط برابر مساوی نشان و نقاط توسط یک خط به هم متصل می‌شوند (Schoeller, Talabi, 2017; 1965).

طبق نظر کومار و خان (Kumar and Khan, 2015) نمودار دوروف به طور گسترده‌ای برای نشان دادن ترکیبات محلول آب طبیعی و نشان دادن فرآیندهای قابل قبول هیدروژئوشیمیایی در سیستم‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Kumar and Khan, 2015; Al-Bassam et al, 1997). شکل ۹ نمودار دوروف در حوضه آبریز چشمه کیله را نشان می‌دهد. از نتایج قابل مشاهده در این نمودار می‌توان به pH بالای آب در این حوضه اشاره کرد که می‌تواند ناشی از غالب بودن لیتولوژی کربناته، آهکی و دولومیتی در حوضه آبریز باشد. کل مواد جامد محلول (TDS)، مجموع کربنات و بی-کربنات ($CO_3^{2-} + HCO_3^{-}$) و مجموع کاتیون‌های قلیایی ($Na^{+} + K^{+}$) در نمونه CH16 به مقدار زیادی بالاست که ناشی از پساب مرکز دفن زباله می‌باشد. همچنین نمونه



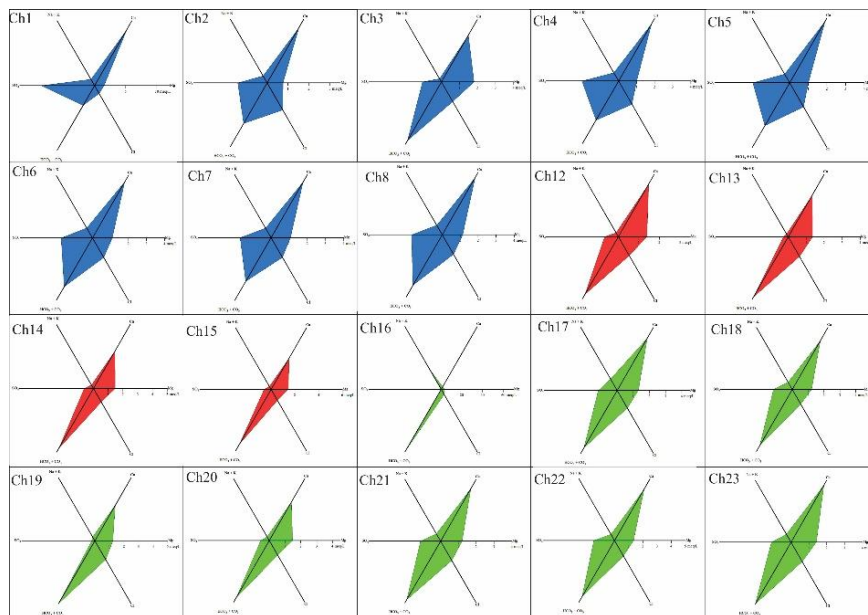
شکل ۹: نمودار دوروف نمونه‌های برداشت شده از حوضه آبریز چشمه کیله (Lloyd and Heathcote, 1985).



شکل ۱۰: نمودار شولر نمونه‌های برداشت شده از حوضه آبریز چشمه کیله (Schoeller, 1965).

می‌کنند. همچنین دو نمونه CH1 و CH16 نیز با سایر نمونه‌ها متفاوت هستند که در نمونه CH16 به دلیل پساب مرکز دفن زباله و در نمونه CH1 به دلیل تفاوت در تیپ آب است.

در نگاه اول به نمودار شولر منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۰)، عدم هماهنگی در سه گروه نمونه‌ها (نمونه‌های رودخانه‌های فرعی دوهزار، سه‌هزار و رودخانه چشمه کیله) به چشم می‌خورد. خطوط نمونه‌های رودخانه فرعی سه‌هزار، دوهزار و رودخانه اصلی چشمه کیله متفاوت و دیگر گروه‌ها را قطع



شکل ۱۱: نمودار شعاعی نمونه‌های برداشت شده از حوضه آبریز چشمه کیله (Gibbs, 1970).

غالب در منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود. در نمودارهای شعاعی نیز الگوی نمونه‌ها در رودخانه‌های فرعی سه‌هزار و دوهزار و رودخانه چشمه کیله متفاوت هستند. در واقع می‌توان گفت که کیفیت آب در چشمه کیله حاصل

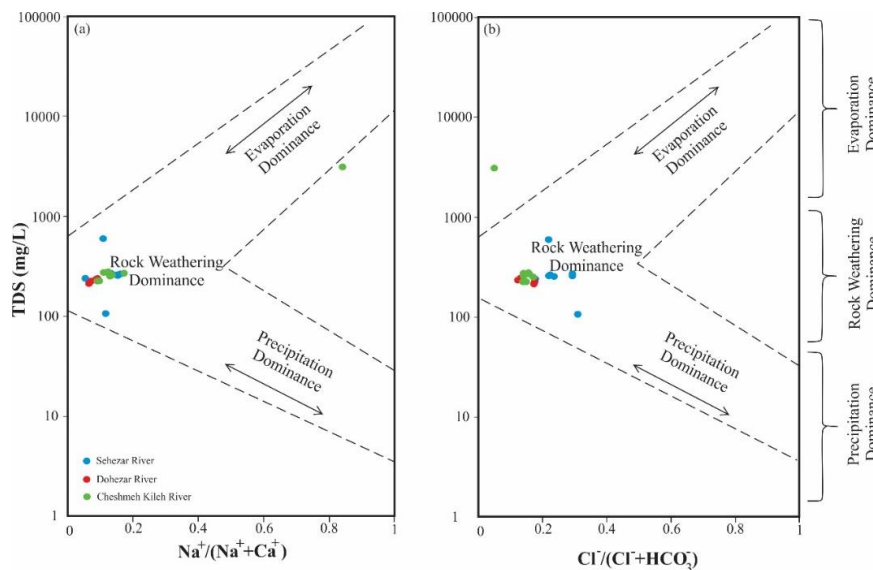
یکی دیگر از ابزارهای بررسی کیفیت هیدروشیمیایی آب رودخانه‌ها ترسیم نمودارهای شعاعی یون‌های غالب در نمونه‌های برداشت شده از آب رودخانه‌های مورد مطالعه است. از این نمودارها جهت تعیین کاتیون و آنیون‌های

موارد جهت تعیین تأثیر فرآیندهای موثر نظیر بارش، تبخیر و هوازدگی سنگ بستر بر ترکیب شیمیایی آب‌های سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد (قره محمودلو و همکاران، ۱۳۹۹؛ Gibbs, 1970). در واقع نمودار گیبس یک ایده کلی در مورد شدت برهمکنش شیمیایی آب-سنگ ارائه می‌دهد. به طور کلی فرآیندهای مختلفی که در طول برهمکنش شیمیایی آب-سنگ رخ می‌دهند که عبارتند از: انحلال، فرآیندهای تبادل یونی، اکسایش و کاهش. انواع سنگ‌ها با توجه به محتوای شیمیایی کانی‌های تشکیل‌دهنده خود به طور کامل و یا جزئی با توجه به مقاومت در برابر هوازدگی شیمیایی در آب حل می‌شوند. ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی و سطحی می‌تواند نشانه اثر متقابل آب-سنگ و فرآیندهای شیمیایی باشد. براساس نحوه توزیع و تجمع نقاط بر روی نمودار گیبس (شکل ۱۲)، عامل اصلی کنترل‌کننده شیمی آب در حوضه آبریز چشمه کیله، هوازدگی شیمیایی کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها هستند. در هر دو نمودار نمونه CH16 خارج از محدوده قرار می‌گیرد که نشان از آن دارد که این نمونه از پساب محل دفن زباله منشأ می‌گیرد و منشأ زمین‌زاد ندارد.

پیوستن دو ترکیب آب متفاوت (دو هزار و سه هزار) است و میانگینی از این دو کیفیت را نمایش می‌دهد (شکل ۱۱). در رودخانه فرعی سه هزار یون‌های Ca^{2+} و $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ، یون‌های غالب هستند که ناشی از لیتولوژی سنگ‌های آهکی غالب در زیرحوضه رودخانه سه هزار است. در رودخانه فرعی دو هزار همچنان $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ یون‌های غالب هستند اما یون SO_4^{2-} به نسبت رودخانه فرعی سه هزار کمتر است. بالاتر بودن یون سولفات در رودخانه فرعی سه هزار ناشی از میان‌لایه‌های ژئوس در ساختار لیتولوژی سازند کرج در بالادست این زیرحوضه است. در نهایت نمودار شعاعی نمونه‌ها در رودخانه چشمه کیله تلفیق آب دو رودخانه فرعی دو هزار و سه هزار را نشان می‌دهند. هرچند ایستگاه CH16 که ناشی از پساب محل دفن زباله است، از الگوی دیگری پیروی می‌کند.

مکانیسم کنترل‌کننده هیدروژئوشیمیایی

گیبس (Gibbs, 1970) مدلی را برای بررسی مکانیسم‌های کنترل‌کننده شیمی آب‌های سطحی و شناخت تکامل آنها، بر مبنای پارامترهای TDS، $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ و $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ (با استفاده از جمع‌آوری و آنالیز نمونه‌های نقاط مختلف دنیا ارائه کرد. نمودارهای گیبس در بسیاری از



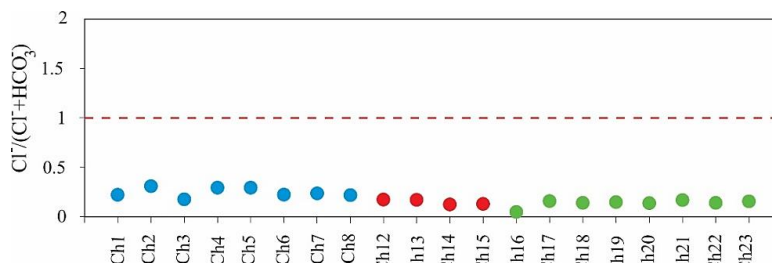
شکل ۱۲: نمودار گیبس، نمایش مکانیسم کنترل هیدروژئوشیمیایی نمونه‌های آب برداشت شده از در حوضه آبریز چشمه کیله (Gibbs, 1970).

که شاخص رول بر پایه نسبت غلظت یون کلر به مجموع یون‌های بی‌کربنات و کربنات استوار است. یون‌های بی‌کربنات و کربنات به‌طور معمول فراوانترین یون‌های موجود

شاخص رول نیز می‌تواند اندیس مناسبی برای ارزیابی و تشخیص آلودگی آب به وسیله آب دریا یا آب‌های شور فسیلی باشد. قره محمودلو و همکاران (۱۳۹۹)، معتقدند

باشد که بدین معنی است که نه تنها در پایین دست آب شور دریا در محیط رودخانه‌های نفوذ نکرده است، بلکه در بالادست حوضه آبریز نیز، کیفیت آب متأثر از شوری آب های محبوس فسیلی نیست.

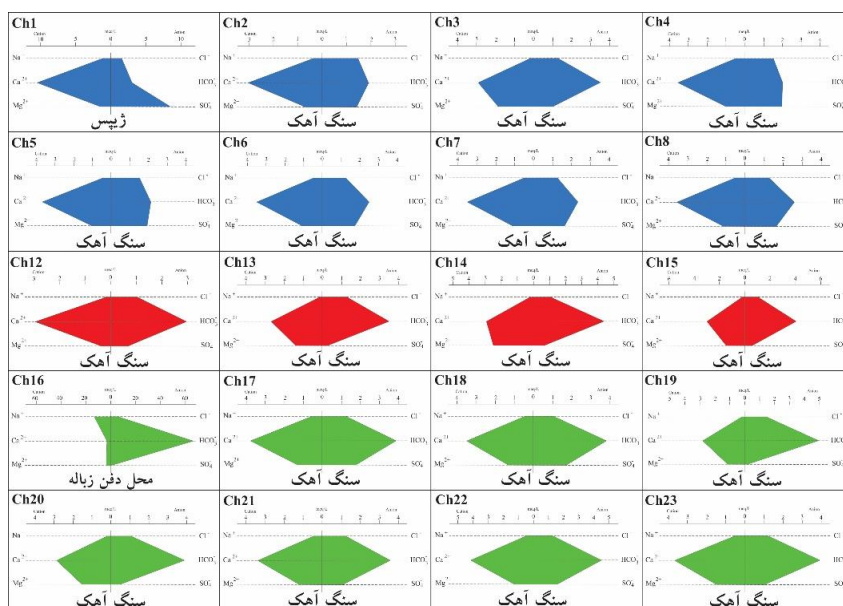
در آب های سطحی و زیرزمینی هستند و در آب دریا به مقدار جزئی وجود دارند، در مقابل یون کلر در آب های شور و یا آب دریا بیش از یون های دیگر می باشد (قره محمودلو و همکاران، ۱۳۹۹؛ Hounslow, 1995). با توجه به نمودار شکل ۱۳، در تمامی نمونه ها شاخص رول کمتر از یک می



شکل ۱۳: نمودار شاخص رول در نمونه های آب برداشت شده از حوضه آبریز رودخانه چشمه کیله (Hounslow, 1995).

نمود که راه حلی مفید و سریع برای شناسایی سنگ منشأ احتمالی است. همچنین گستردگی دیاگرام نشانگر بالا بودن غلظت یون ها است (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۹۹؛ Hounslow, 1995).

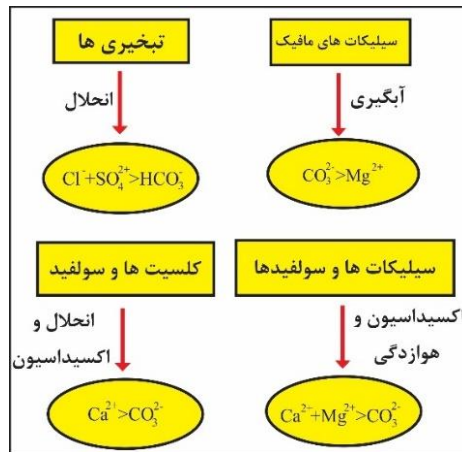
نمودار استیف روش گرافیکی دیگری برای نمایش شیمی کلی آب است. هانسلو (Hounslow, 1995) شش الگو (شکل ۶ الف) براساس سنگ منشأ احتمالی و تغییرات عناصر اصلی آب، را جهت مقایسه شباهت یا تفاوت منتشر



شکل ۱۴: نمودار استیف در نمونه های آب برداشت شده از حوضه آبریز چشمه کیله (Hounslow, 1995).

در نمونه CH3 اسیدهای ضعیف (بی کربنات) نسبت به اسیدهای قوی غالب است. در رودخانه فرعی دوهزار نیز لیتولوژی غالب سنگ آهک است. در رودخانه اصلی چشمه کیله نمونه CH16 نمایانگر تغییرات شدید حاصل از پساب مرکز دفن زباله است؛ اما پس از ترکیب با حجم بالای رودخانه چشمه کیله، نمونه های بعد از آن دارای منشأ غالب سنگ های آهکی هستند.

براساس نمودارهای استیف نمونه های حوضه آبریز چشمه کیله (شکل ۱۴)، در رودخانه فرعی سه هزار نمونه CH1 از لیتولوژی غالب ژئیس و نمونه های CH2 تا CH8 از لیتولوژی غالب سنگ آهک منشأ می گیرند. نکته قابل ذکر اینکه در نمونه CH3 مقدار آنیون بی کربنات نسبت به سایر نمونه های رودخانه فرعی سه هزار بیشتر است. همچنین همانطور که در نتایج حاصل از نمودار پایپر نیز ذکر گردید



شکل ۱۵: روابط بین خاستگاه و ترکیب آب در حوضه آبریز چشمه کیله (Jones and Deocampo, 2014).

آهن در ذخیره معدنی آهن) و همچنین اکسیداسیون و هوازگی سیلیکات‌ها (واحد الیون مونزونیت (im) و هورنبلند پورفیریت (ip)) و سولفیدها هستند.

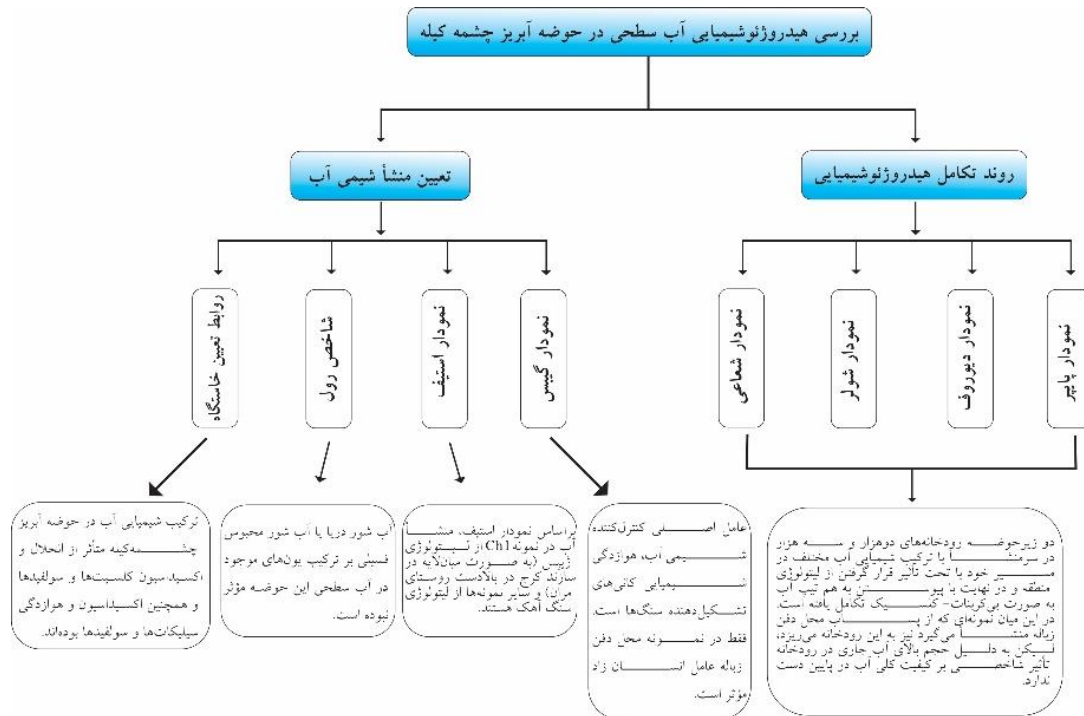
نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به جهت بررسی تکامل هیدروژئوشیمیایی و پایش کیفیت آب سطحی در حوضه آبریز رودخانه چشمه کیله انجام شد. شکل ۱۶ نتایج حاصل از این پژوهش را به‌طور خلاصه بیان می‌کند. دو زیرحوضه رودخانه‌های دوهزار و سه هزار در سرمنشأ با ترکیب شیمیایی آب مختلف در مسیر خود با تحت‌تأثیر قرار گرفتن از لیتولوژی منطقه و در نهایت با پیوستن به هم تیپ آب به صورت بی‌کربنات- کلسیک تکامل یافته است. در این میان نمونه ای که از پساب محل دفن زباله منشأ می‌گیرد نیز به این رودخانه می‌ریزد، لیکن به دلیل حجم بالای آب جاری در رودخانه تأثیر شاخصی بر کیفیت کلی آب در پایین دست ندارد. بر طبق نمودار گیبس عامل اصلی کنترل‌کننده شیمی آب در حوضه آبریز چشمه کیله، هوازگی شیمیایی کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها است و فقط در نمونه CH16 (محل دفن زباله) عامل انسان زاد مؤثر بوده است. همچنین به کمک شاخص رول مشخص شد که آب شور دریا و یا آب شور محبوس فسیلی بر ترکیب یون‌های موجود در آب سطحی این حوضه مؤثر نبوده‌اند. به کمک الگوهای ارائه شده برای نمودار استیف توسط هانسلو، منشأ آب‌ها در نمونه CH1 از لیتولوژی ژئوپس و سایر نمونه‌ها غالباً از لیتولوژی سنگ آهک مشخص گردید. وجود میان لایه‌های

تکامل منابع آب با جنس رخنمون‌های سنگی اطراف حوضه آبریز، واکنش آنها با آب‌های موجود و ویژگی‌های آب ارتباط دارد. جنس سازندهای زمین‌شناسی اطراف حوضه یکی از عوامل مهم در روند تکامل منابع آبی محسوب می‌شود. هوازگی شیمیایی سنگ‌های مختلف در اثر واکنش با آب‌های ورودی، کاتیون و آنیون‌های متفاوتی تولید می‌کند (جوانبخت و همکاران، ۱۳۹۹؛ Jones and Deocampo, 2014). مطابق با روابط شکل ۷ و داده‌های آزمایشگاهی، روابط صادق در نمونه‌های مورد مطالعه در شکل ۱۵ مشخص شده‌اند. در نمونه‌های CH1، CH2، CH4 و CH5 رابطه $Cl^{-} + SO_4^{2-} > HCO_3^{-}$ برقرار است که نشان از منشأ یون‌های این نمونه‌ها از انحلال سنگ‌های تبخیری همانند ژئوپس در ساختار سازند کرج در بالادست این ایستگاه‌ها دارد. در نمونه CH3، CH17، CH18، CH19، CH20، CH21، CH22 و CH23 رابطه $CO_3^{2-} > Mg^{2+}$ برقرار است که نشان‌دهنده خاستگاه آب از لیتولوژی سیلیکات‌های مافیک در اثر فرایند آبگیری است. از جمله سنگ‌های مافیک موجود در حوضه آبریز می‌توان به گابرو و میکروگابروهای موجود در منطقه روستای برسه در زیرحوضه رودخانه فرعی دوهزار نام برد. با توجه به اینکه در تمامی ایستگاه رابطه $Ca^{2+} + Mg^{2+} > CO_3^{2-}$ و در تمامی ایستگاه‌ها به جز CH15 رابطه $Ca^{2+} > CO_3^{2-}$ صادق می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب شیمیایی آب در حوضه آبریز چشمه کیله غالباً متأثر از انحلال و اکسیداسیون کلسیت‌ها و سولفیدها (ذخیره معدنی پیریت، کالکوپیریت احتمالی در ذخیره معدنی مس و سولفیدهای

توان نتیجه گرفت که ترکیب شیمیایی آب در حوضه آبریز چشمه کیله متأثر از انحلال و اکسیداسیون کلسیتها و سولفیدها و همچنین اکسیداسیون و هوازگی سیلیکاتها و سولفیدها بوده‌اند.

ژئوپس در ساختار سازند کرج در بالادست ایستگاه CHI در روستای مران می‌تواند شاهدهی بر این تحلیل باشد. براساس رابطه بین خاستگاه و ترکیب آب، خاستگاه برخی از ایستگاهها از انحلال سنگهای تبخیری و برخی دیگر ناشی از آبیگری سیلیکاتها تشخیص داده شد. به‌طور کلی می



شکل ۱۶: چارت روند بررسی تکامل هیدروژئوشیمیایی و فرایندهای موثر بر شیمی آب در حوضه آبریز چشمه کیله.

سطحی حوضه‌های آبریز رودخانه‌های شیرود و چشمه کیله غرب استان مازندران، شمال ایران" می‌باشد. بدین وسیله از مساعدت‌های حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان تقدیر و تشکر می‌گردد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر مستخرج از رساله دکتری تخصصی رشته زمین‌شناسی زیست‌محیطی تحت عنوان "بررسی هیدروژئوشیمی و ژئوشیمی زیست‌محیطی منابع آب‌های

پانوش

- 1-Hydrochemical Evolution
- 2-Cheshmeh Kileh River
- 3-Salmo Trutta Caspius
- 4-Rutilus Frisii Kutum
- 5-Dohezar River
- 6-Sehezar River
- 7-Northern zone of Central Alborz
- 8-SASplanet Software, Version 211230
- 9-Global Mapper Software, version 22.1
- 10-Google Earth Pro Software
- 11-Shapefile
- 12-DEM (Digital Elevation Model)
- 13-ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)
- 14-United State Geological Survey
- 15-ArcMap Software, version 10.7.1
- 16-Strahler Method
- 17-American Public Health Association (APHA)
- 18-Rockware AqQA Software 2015, version 10.5.0
- 19-Piper Diagram
- 20-Durov Diagram
- 21-Stiff Diagram
- 22-Schoeller Diagram
- 23-Radial Plot Diagram
- 24-Gibbs Diagram
- 25-Role Index Diagram
- 26-Microsoft Excel Worksheet, version 2019
- 27-CorelDRAW X7 Graphic

(References) منابع

- Abbaspour, R., Alizadeh Sabet, H.R., Hedayati Fard, M. and Mesgaran Karimi, J., 2012. Biological evaluation of Cheshme Kileh Tankabon river (Mazandaran province) using biological indicators, population structure and fauna of benthic macroinvertebrates. *Journal of Aquatics and fisheries*, v. 2(8), p. 63-76 (in Persian).
- Asgharai Moghaddam, A., Nadiri, A.A. and Sadeghi Aghdam, F., 2020. Investigation of groundwater hydrogeochemical characteristics of Naqadeh plain aquifer and heavy metal pollution index (HPI). *Scientific Quarterly Journal, Geosciences*, v. 29(115), p. 97-110, <https://dx.doi.org/10.22071/gsj.2018.127310.1464> (in Persian).
- Al-Bassam, A.M., Awad, H.S. and Al-Alawi, J.A., 1997. Durov plot: a computer program for processing and plotting hydrochemical data. *Journal of Groundwater*, v. 35(2), p. 362-367. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00094.x>
- Annells, R.N., Arthurton, R.S., Bazley, R.A.B., Davies, R.G., Hamed, M.A.R. and Rahimzadeh, F., 2000. Geological map of IRAN, 1:100000 Shakran. Geological survey & mineral exploration of IRAN (GSI). Series sheet 6162.
- Baharfirouzi, Kh., Nadim, H., Shafeii, A.R., Sahandi, M.R., Vahdati Daneshmand, F., Nazari, H. and Khannazer, N.H., 2000. Geological map of IRAN, 1:100000 Ramsar. Geological survey & mineral exploration of IRAN (GSI). Series sheet 6163 (in Persian).
- Erfanian Kaseb, H., Torshizian, H.A., Jahani, D., Javanbakht, M. and Kohansal Ghadimvand, N., 2020. Studying Evolutionary Processes of Petergan Playa Brines in South Khorasan, East of Iran. *Journal of Geopersia*, v. 10(2), p. 333-349. <https://dx.doi.org/10.22059/geope.2020.287814.648497>
- GharehMahmoodlu, M., Jandaghi, N. and Sayadi, M., 2020. Hydrochemical evaluation and qualitative deterioration assessment of Gorganrud River, *Iranian Journal of Geology*, v. 14(55), p. 129-145. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=543708> (in Persian).
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry, *Journal of Science*, v. 170(3962), p. 1088-1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- Guest, B., Axen, G.J., Lam, P.S. and Hassanzadeh, J., 2006. Late Cenozoic shortening in the west-central Alborz Mountain, northern Iran, by combined conjugate strike slip and thin-skinned deformation, *Journal of Geosphere*, v. 2, p. 35-52.
- Hakimi Asiabar, S., 2019. Structural deformations of Dona mine, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, v. 28(110), p. 235-246. <https://dx.doi.org/10.22071/gsj.2017.78835.1052> (in Persian).
- Hasanipak, A.A., 2017. *Geostatistics: Tehran University Printing and Publishing Institute*, 5th, 314 p (in Persian).
- Hounslow, A.W., 1995. *Water quality data: analysis and interpretation*. CRC press, 1st Edition. <https://doi.org/10.1201/9780203734117>
- Javanbakht, M., Asadi, V. and Dabiri, R., 2020. Evaluation of Hydrogeochemical Characteristics and Evolutionary Process of Groundwater in Jajarm Plain, Northeastern Iran. *Environment and Water Engineering*, v. 6(3), p. 206-218. <https://dx.doi.org/10.22034/jewe.2020.232598.1366> (in Persian).
- Jones, B.F. and Deocampo, D.M., 2014. *Geochemistry of saline lakes*. Treatise on geochemistry, v. 5, 605 p.
- Kumar, M.S. and Khan, F.L.A., 2015. Analysis of groundwater quality of some selected stations of Palar Riverbed in Vellore district, Tamilnadu, India. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, v. 2(5).
- Lloyd, J.W. and Heathcote, J.A.A., 1985. *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater*. Clarendon Press, Oxford.
- Mahrooyan, F., Taghavi, L., Sarai Tabrizi, M. and Babazadeh, H., 2021. Water Quality Assessment of Qazvin River Using NSFQI Index for Water Quality Classification, *Journal of Wetland Ecobiology*, v. 12(1), p. 99-112. <http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-855-en.html> (in Persian).
- Mohammadihadi, H., Kalantari, N., Anbari, A. and Pahlavanizadeh, S., 2021. Hydrochemical assessment of the Jareh Dam water resources; using multivariate statistical techniques and hydrochemical methods, *Journal of Advanced Applied Geology*, v. 10(4), p. 620-633.

- <https://dx.doi.org/10.22055/aag.2020.29692.1993> (in Persian).
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water- analyses, *Journal of Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 25(6), p. 914-928. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Rice, E.W., Bridgewater, L. and American Public Health Association (Eds.), 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater* (v. 10). Washington, DC: American public health association.
- Richards, L.A., Fox, B.G., Bowes, M.J., Khamis, K., Kumar, A., Kumari, R. and Polya, D.A., 2022. A systematic approach to understand hydrogeochemical dynamics in large river systems: Development and application to the River Ganges (Ganga) in India, *Water Research*, v. 211, p. 118054.
- Safari, M., Hezarkhani, A. and Mashhadi, S.R., 2020. Hydrogeochemical characteristics and water quality of Aji-Chay river, eastern catchment of Lake Urmia, Iran, *Journal of Earth System Science*, v. 129, p. 1-15.
- Schoeller, H., 1965. Qualitative evaluation of groundwater resources, *Methods and techniques of groundwater investigations and development*, UNESCO, 83 p.
- Singh, A.K., Raj, B., Tiwari, A.K. and Mahato, M.K., 2013. Evaluation of hydrogeochemical processes and groundwater quality in the Jhansi district of Bundelkhand region, India. *Journal of Environmental Earth Sciences*, v. 70(3), p. 1225-1247. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2209-7>
- Singh, K.R., Goswami, A.P., Kalamdhad, A.S. and Kumar, B., 2020. Assessment of surface water quality of Pagladia, Beki and Kolong rivers (Assam, India) using multivariate statistical techniques. *International Journal of River Basin Management*, v. 18(4), p. 511-520. <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1566236>
- Talabi, A.O., 2017. The Suitability of Groundwater for Domestic and Irrigation Purpose; a case study of Ikere Ekiti, SW Nigeria. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*, v. 2(1), p. 181-194. <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/2.1.23>
- Tharmar, E., Abraham, M., Prakash, R., Sundaram, A., Flores, E.S., Canales, C. and Alam, M.A., 2022. Hydrogeochemistry and Water Quality Assessment in the Thamirabarani River Stretch by Applying GIS and PCA Techniques, *Sustainability*, v. 14(24), p. 16368.
- Yazdi, M., 2002. *Conventional methods in geochemical exploration: Shahid Beheshti University*, 1th, 192 p (in Persian).
- Yotova, G., Varbanov, M., Tcherkezova, E. and Tsakovski, S., 2021. Water quality assessment of a river catchment by the composite water quality index and self-organizing maps: *Journal of Ecological indicators*, v. 120, p. 106872.