

و بررسی علل ایجادکننده آن‌ها پرداخته شد. نتایج نمودار پایپر نشان داد تیپ و رخساره غالب در حوضه از نوع کلوروه سدیک می‌باشد که بیانگر شور بودن آب زیرزمینی در این منطقه است. نتایج حاصل از نمودارهای ترکیبی نشان داد فرایند تبخیر، انحلال هالیت، تعویض کاتیونی، هوازگی و انحلال سنگ‌ها و کانی‌ها به‌ویژه کربنات‌ها چون کلسیت، دولومیت و به مقدار کم تر ژپس و سیلیکات‌ها و هم‌چنین فعالیت‌های کشاورزی و نفوذ آب‌های شور برگشتی حاصل از کشاورزی، از عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی هستند.

واژگان کلیدی: رخساره آب، منابع آلودگی، کیفیت، کشاورزی، نمودار پایپر.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یک منبع آبی قابل توجه و منبع اصلی آب برای اهداف مختلف است [۱۷]. در سال‌های اخیر، صنعتی شدن، شهرنشینی و رشد اقتصادی تأثیر قابل توجهی بر کیفیت آب زیرزمینی خواهد داشت. کیفیت آب تابعی از پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است، به‌طور عمده توسط دو عامل طبیعی و انسانی کنترل می‌شود. فرایندهای طبیعی از قبیل سنگ‌شناسی منطقه، سرعت حرکت آب زیرزمینی، کیفیت آب تغذیه‌شده، تعامل آب با سنگ و خاک، واکنش با آبخوان‌های دیگر و فعالیت‌های مربوط به دخالت انسان شامل فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، توسعه شهری و افزایش بهره‌برداری از منابع آب هستند [۴]. در طول مسیر حرکت آب زیرزمینی فرایندهایی از قبیل رسوب‌گذاری کانی‌ها، انحلال، تعویض کاتیونی و غیره به وقوع می‌پیوندد که به‌شدت بر روی کیفیت آب مؤثرند. برای پی‌بردن به این واکنش‌ها می‌توان از نمودارهای ترکیبی مختلف و مدل‌سازی هیدروشیمیایی استفاده کرد. در نمودارهای ترکیبی، برای تعیین رابطه بین پارامترهای حاصل از تجزیه نمونه‌های آب، این پارامترها بر روی نمودارهای دو متغیره ترسیم می‌شوند که با توجه به نحوه آرایش نمونه‌ها در این نمودارها می‌توان فرایندهای مؤثر بر شیمی آب زیرزمینی را تعیین کرد [۷]. هم‌چنین برای تعیین تیپ غالب هیدروشیمیایی که تابعی است از لیتولوژی، قدرت انحلالی و الگوی جریان از نمودار پایپر استفاده می‌شود [۱۳]. امروزه خصوصیات کیفی آب یکی از پارامترهای است که

تحلیل تغییرات پارامترهای شیمیایی کیفیت آب در حوضه آبخیز بافق

سید مسعود سلیمان‌پور^{۱*}، سکینه لطفی‌نسب^۲، امید رحمتی^۳، محبوبه معتمدنیا^۴

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۴/۱۶ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

DOI/ 10.22034/WMJ.2025.2065092.1120

چکیده

آب زیرزمینی، منبع اولیه آب برای مصارف خانگی، کشاورزی و صنعتی در بسیاری از کشورها بوده و کاهش کیفیت آن به‌عنوان یکی از جدی‌ترین مشکلات شناخته‌شده است. کیفیت آب‌های زیرزمینی به ماهیت سنگ‌بستر، توپوگرافی، زمین‌شناسی، خاک، اقلیم، بارش جوی و کیفیت آب‌های تغذیه‌شده و منابع آلودگی انسانی از نظر فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی بستگی دارد. علاوه بر این، کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌تواند با استفاده از واکنش‌های ژئوشیمیایی زیرسطحی مانند هوازگی، انحلال، بارش، تبادل یونی و فرایندهای مختلف بیولوژیکی تحت تأثیر قرار گیرد. به همین منظور پژوهش حاضر باهدف بررسی کیفیت آب شیمیایی حوزه آبخیز بافق انجام شده است. داده و اطلاعات لازم کیفیت شیمیایی منابع آب زیرزمینی با مراجعه به سازمان تحقیقات منابع آب ایران و سازمان آب منطقه‌ای استان یزد و کرمان در دوره مشترک آماری ۱۷ ساله از سال آبی ۱۳۸۱-۸۲ تا سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ اخذ شد. به‌منظور تعیین تیپ آب، توالی غالبیت آنیون‌ها و کاتیون‌ها و تعیین فرایندهای هیدروشیمیایی و ترکیبات شیمیایی آب از نمودار پایپر استفاده شد. با استفاده از نمودارهای ترکیبی و گیبس، به تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی

۱- دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران. * نویسنده مسئول

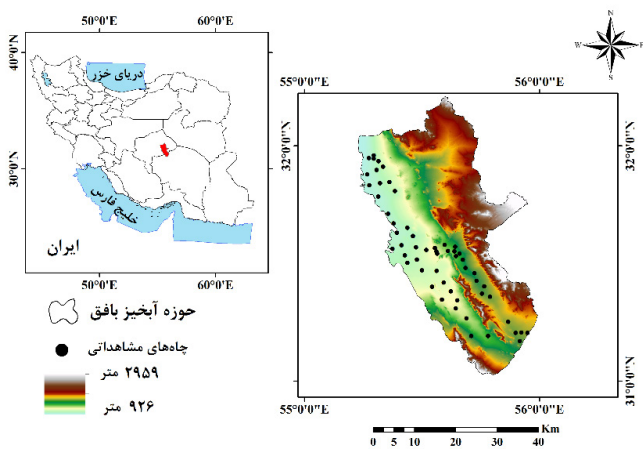
Email: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

۲- استادیار بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۳- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران.

۴- دکتری تخصصی، اداره‌ی منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان بافق، استان یزد، ایران.

گرم منطقه می‌توان خرما و پسته را مهم‌ترین محصولات کشاورزی این منطقه معرفی نمود، همچنین به تولید محصولات کشاورزی گندم، جو و روناس پرداخته می‌شود [۱۲]. شکل ۱ نمایی از منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت حوزه‌ی آبخیز بافق

روش پژوهش

جمع‌آوری داده‌های آماری

به منظور انجام پژوهش حاضر با مراجعه به سازمان تحقیقات منابع آب ایران (تماب) و سازمان آب منطقه‌ای استان‌های یزد و کرمان، اطلاعات کیفیت شیمیایی منابع آب زیرزمینی شامل چاه‌های عمیق، نیمه‌عمیق، چشمه‌ها و قنات از اخذ شد. با توجه به تازه تأسیس بودن اکثر ایستگاه‌ها، و وجود نقص آماری در بعضی سال‌ها، در نهایت دوره مشترک آماری ۱۷ ساله از سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ تا سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ برای این پژوهش در نظر گرفته شد. در ادامه میزان پارامترهای کیفی آب از جمله کاتیون‌ها (کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، سدیم (Na) و پتاسیم (K))، آنیون‌ها (کلر (Cl)، سولفات (SO₄)، نیترات، کربنات، بی‌کربنات (HCO₃) و کربنات)، هدایت الکتریکی (EC)، مجموع املاح محلول، میزان اسیدیته آب (pH)، درصد سدیم، درصد سدیم جذب‌ی، کربنات، نیترات، سولفات و کلر، تعیین شد. لازم به ذکر است که نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون آماری کلموگروف-اسمیرنوف بررسی شد.

تعیین تیپ آب، توالی غالبیت آنیون‌ها و کاتیون‌ها

به منظور تعیین تیپ آب، توالی غالبیت آنیون‌ها و کاتیون‌ها و تعیین فرایندهای هیدروشیمیایی و ترکیبات شیمیایی آب از نمودار پایپر استفاده شد [۲۴]. استفاده از نمودارهای مثلثی، به منظور نمایش داده‌های هیدروشیمیایی برای اولین بار توسط هیل و سپس به وسیله پایپر توسعه پیدا کرد [۲۶]. در این نمودارها، یون‌ها در دو مثلث به صورت درصدی از آنیون‌ها و کاتیون‌ها به میلی‌اکی‌والان بر لیتر رسم می‌شوند که مقادیر ترسیمی برای آنالیز به لوزی بین دو مثلث

ضرورت لحاظ آن در برنامه‌ریزی مربوط به مدیریت منابع آب و ارزیابی سلامت حوزه‌های آبخیز و ایجاد تغییرات مدیریتی در آن کاملاً احساس شده ولی تا به حال کم‌تر مورد توجه قرار گرفته شده است [۵]. به این منظور، ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی و شناسایی خطرات آلاینده برای مدیریت منابع آب زیرزمینی ضروری است. در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت موضوع محققان داخل و خارج از کشور، شروع به مطالعه تغییرات کیفیت آب‌های زیرزمینی کرده‌اند [۱۴، ۱۸، ۲۳، ۱۶]. اسمعلی و همکاران [۱۵] به بررسی اثر کیفیت آب‌های زیرزمینی در استان اسیوط شمالی، مصر، برای مصارف شرب و آبیاری با استفاده از آمار چند متغیره و روش‌های هیدروشیمیایی پرداختند. نتایج نمودار پایپر نشان می‌دهد که نوع سدیم و پتاسیم (Na+K) بر شیمی آب غالب است و به دنبال آن نوع مخلوط قرار می‌گیرد. اسمعلی و همکاران [۱۵]، عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت قره ضیال‌الدین، استان آذربایجان غربی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از نمودارهای ترکیبی حاکی از آن است که نفوذ آب شور برگشتی حاصل از کشاورزی، تعویض کاتیونی، هوازدگی و انحلال سنگ‌ها و کانی‌ها به ویژه کربنات‌ها، سیلیکات‌ها، ژپس و هالیت و فرایند تبخیر به میزان اندک از عوامل بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی منطقه هستند. عزیزی و همکاران [۲]، به ارزیابی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت باشت در جنوب استان کهگیلویه و بویراحمد و کیفیت آن با استفاده از شاخص‌های کیفی پرداختند. مطابق نتایج مشخص شد که تیپ و رخساره آب زیرزمینی این منطقه بی‌کربنات کلسیت و سولفات کلسیت بوده است.

حوزه‌ی آبخیز بافق به دلیل واقع شدن در بخش ایران مرکزی و قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک باعث شده که از نظر منابع آب سطحی در وضعیت مناسبی قرار نگیرد. به همین دلیل آب زیرزمینی در این منطقه از اهمیت بالایی برای بحث کشاورزی و شرب برخوردار است. از این رو هدف از این پژوهش بررسی فرایندهای مؤثر بر هیدروشیمیایی آب زیرزمینی یا در واقع تعیین تیپ آب، توالی غالبیت آنیون‌ها و کاتیون‌ها با استفاده از نمودار پایپر و تعیین رخساره آب زیرزمینی توسط نمودارهای ترکیبی و گیبس می‌باشد.

مواد و روش

معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

حوزه‌ی آبخیز بافق در استان‌های یزد و کرمان واقع شده است و قسمت عمده این آبخیز، در استان یزد قرار گرفته است. مساحت و متوسط ارتفاع این محدوده به ترتیب ۶۵ / ۴۷۹۳ کیلومتر مربع و ۱۴۳۷/۹۴ متر می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه و دما نیز برابر با ۱۱۰ میلی‌متر و ۲۰/۷۱ درجه سانتی‌گراد است. کاربری اراضی غالب منطقه شامل اراضی مرتعی، کشاورزی دیم، دیم‌زارها، اراضی صخره‌ای-کوهستان و مناطق مسکونی می‌باشد. به دلیل آب‌وهوای

منتقل می‌شود [۱۰]. در دیاگرام پایپر، مقایسه تعداد زیادی داده‌های آنالیز شده امکان‌پذیر می‌شود؛ ولی هیچ‌کدام از مثلث‌ها غلظت واقعی را نشان نمی‌دهند. علاوه بر این، در دیاگرام پایپر، میدان عمل محدودتر و شلوغ‌تر است. اندازه دایره‌های ترسیمی در نمودار پایپر می‌تواند مقدار مواد محلول کلی را نشان دهد [۲۰].

نمودار پایپر، مشخصات شیمیایی آب را بر حسب غلظت نسبی تشکیل‌دهنده‌های آن نشان می‌دهد. قابل‌ذکر است که در منطقه ۱ قلیایی‌های خاکی بیش از قلیایی‌ها و در منطقه ۲ قلیایی‌ها بیش از قلیایی‌های خاکی است. در منطقه ۳ اسیدهای ضعیف بیش از اسیدهای قوی و در منطقه ۴ اسیدهای قوی بیش از اسیدهای ضعیف است. در منطقه ۵ سختی کربناتی از ۵۰ درصد تجاوز می‌کند. به عبارت دیگر قلیایی‌های خاکی و اسیدهای ضعیف غالب هستند. در منطقه ۶ سختی غیرکربناتی متجاوز از ۵۰ درصد است. در منطقه ۷ قلیایی غیرکربناتی بیش از ۵۰ درصد و برتری با قلیایی‌ها و اسیدهای قوی است. آب اقیانوس‌ها و آب‌های خیلی شور در این منطقه و نزدیک به رأس سمت راست آن قرار دارد. در منطقه ۸ قلیایی کربناتی متجاوز از ۵۰ درصد است. در این جا آب‌هایی قرار می‌گیرند که سختی آن‌ها در مقایسه با مواد محلول موجود در آن‌ها خیلی کم می‌باشد. در منطقه ۹ هیچ زوج آنیون-کاتیونی از ۵۰ درصد تجاوز نمی‌کند [۱].

تعیین تیپ و رخساره‌ی آب زیرزمینی

با استفاده از نمودارهای ترکیبی و گیبس، به تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی و بررسی علل ایجادکننده آن‌ها پرداخته شد [۲۷]. مطابق با نظر گیبس [۹]، عواملی چون اثر تعامل و واکنش میان آب و سنگ‌ها، فرآیند تبخیر و خروج آب به شکل بخار و اثر ریزش‌های جوی وارد بر زمین بر وجود مواد محلول در آب‌های زیرزمینی دخالت دارند.

نمودار گیبس، بر پایه‌ی پارامترهای کل مواد جامد محلول (TDS) و نسبت‌های یونی Ca ، Na ، Cl و HCO_3 به صورت $Na/(Na+Ca)$ و

نتایج

بررسی کیفیت آب زیرزمینی در طول دوره‌ی آماری

به منظور بررسی کیفیت آب زیرزمینی در مقیاس سالانه، نتایج پارامترهای کیفیت شیمیایی آب‌های زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز بافق در جدول (۱) ارائه شده است. پارامترهای کیفی در طول زمان تغییرات محسوسی داشته و تنها غلظت CO_3 در این آبخیز، صفر بوده است.

نتایج ترسیم نمودار پایپر در حوزه‌ی آبخیز بافق طی بازه‌های زمانی ۸۷-۱۳۸۱، ۹۲-۱۳۸۸ و ۹۷-۱۳۹۳ نشان داد ناحیه‌ی مثلی آنیون نمونه‌های آب زیرزمینی در طبقه‌ی سولفات و ناحیه‌ی کاتیون‌ها در طبقه‌ی سدیم (پتاسیم) قرار می‌گیرند (شکل‌های ۲ تا ۴). به عبارت دیگر، کاتیون‌های آب زیرزمینی در آبخیز بافق، از نوع سدیک (سدیم+پتاسیم) بوده و آنیون‌ها از نوع سولفات می‌باشند. هم‌چنین موقعیت کاتیون‌ها و آنیون‌های در میدان لوزی نمودار پایپر نشان داد نمونه‌های آب زیرزمینی در دو تیپ و رخساره‌ی $Na-Cl$ (کلروه سدیک) و $Mg-HCO_3$ (بی‌کربنات منیزیک) گسترش یافته‌اند که بر این اساس، تقریباً تمامی نمونه‌ها به استثنای یک نمونه، دارای تیپ و رخساره‌ی $Na-Cl$ می‌باشند. غالبیت تیپ و رخساره‌ی $Na-Cl$ حاکی از شور بودن آب زیرزمینی در این آبخیز می‌باشد. نتایج بررسی محل تمرکز یون نمونه‌های آب زیرزمینی در

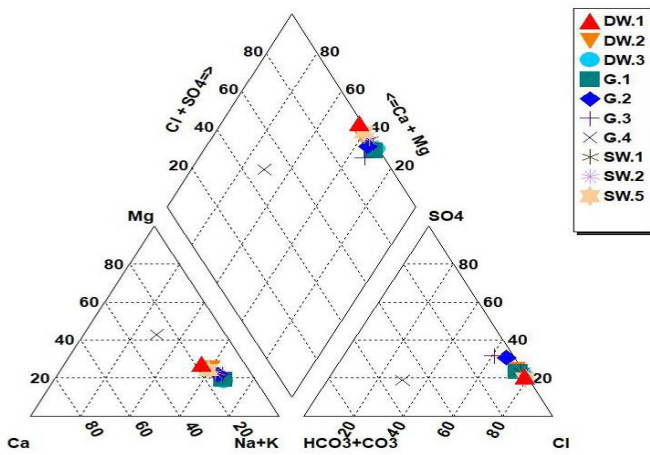
جدول ۲: مشخصه‌های آماری کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز بافق طی دوره‌ی آماری

So ₄	Cl	Co ₃	HCO ₃	k	mg	Ca	Na	Th	مشخصه‌های آماری			TDS mg/l	EC µs/cm	
									Na%	SAR	pH			
۲۸/۶۳	۷۶/۸۶	۰/۰۰	۲/۹۱	۰/۱۷	۱۶/۷۲	۱۶/۹۳	۷۴/۲۳	۱۶۷۱/۸	۶۶/۱۵	۱۷/۱۶	۷/۶۱	۶۷۰۹/۹	۱۰۲۳۸/۲	میانگین
۶۶/۰۵	۱۴۵/۲	۰/۰۰	۷/۹۲	۰/۴۶	۴۲/۶۱	۴۶/۶۰	۱۴۶/۱	۳۷۴۰/۱	۸۰/۴۵	۳۱/۸۷	۸/۸۰	۱۲۵۶۰	۱۸۰۴۵	حداکثر
۰/۲۰	۱/۰۷	۰/۰۰	۱/۳۵	۰/۰۰	۱/۴۲	۱/۰۴	۰/۸۷	۱۵۷/۹۸	۱۷/۵۶	۰/۶۱	۵/۷۲	۲۶۵/۰۰	۴۱۵/۰۰	حداقل
۱۵/۹۷	۴۶/۱۵	۰/۰۰	۱/۲۷	۰/۱۱	۱۰/۰۲	۱۰/۲۵	۴۲/۱۶	۹۸۴/۱۵	۱۱/۷۷	۷/۳۸	۰/۴۹	۳۸۵۸/۲	۵۷۴۴/۰۴	انحراف معیار
۰/۵۶	۰/۶	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۶۶	۰/۶	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۱۸	۰/۴۳	۰/۰۳	۰/۵۸	۰/۵۶	cv
۵۵/۷۸	۶۰/۰۵	۰/۰۰	۴۳/۸۱	۶۵/۵۲	۵۹/۹۵	۶۰/۵۵	۵۶/۷۹	۵۸/۸۶	۱۷/۷۹	۴۳	۶/۴۳	۵۷/۵	۵۶/۱	%cv

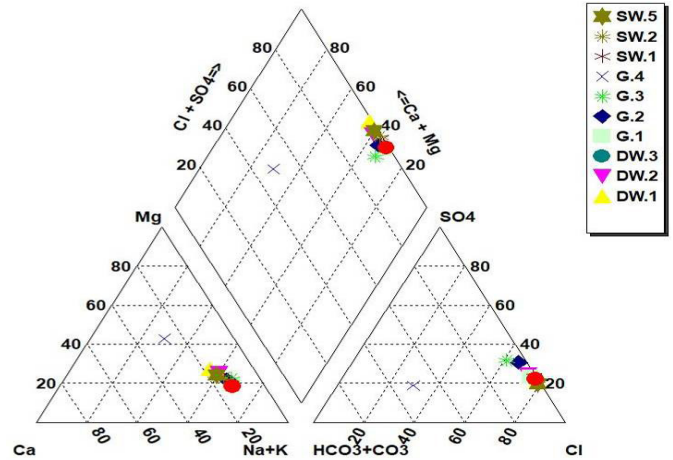
درصد نمونه‌ها، به ترتیب آنیون‌های کلر، سولفات و بی‌کربنات، غالب بوده و کاتیون‌های غالب، به ترتیب سدیم (پتاسیم)، کلسیم و منیزیم می‌باشند. تنها ۱۰ درصد نمونه‌ها توالی غالبیت آنیون‌های به‌صورت بی‌کربنات-کلر-سولفات داشتند. نحوه‌ی توسعه‌ی تیپ و رخساره نیز به‌صورت توسعه‌ی اساسی برای ۹۰ درصد از نمونه‌ها و توسعه‌ی انتقالی برای ۱۰ درصد باقی‌مانده می‌باشد. در بازه‌ی زمانی ۱۳۹۳-۹۷ (جدول ۴)، توالی غالبیت آنیون‌ها همانند دوره‌های ماقبل می‌باشد؛ درحالی‌که غالبیت کاتیون‌ها برای یک نمونه (۷ درصد از کل نمونه‌ها) به‌صورت منیزیم، کلسیم و سدیم (پتاسیم) تغییر کرده است. بر این اساس، تیپ و رخساره‌ی ۹۰ درصد نمونه‌ها به‌صورت کلروره سدیک باقی‌مانده و تنها برای یک نمونه تیپ و رخساره به‌صورت بی‌کربنات-منیزیک و بی‌کربنات-سدیک می‌باشد. در شکل ۵، فراوانی تیپ و رخساره‌ها برای مجموع منابع آبی بافق طی بازه‌های زمانی مختلف نشان داده‌شده است.

ناحیه‌ی لوزی پایپر نشان داد بر طبق تقسیم‌بندی‌های ارائه‌شده توسط پایپر، قلیایت غیرکربناته (شوری اولیه) برای تقریباً تمامی نمونه‌ها بیش‌تر از ۵۰ درصد است. هم‌چنین اسیدهای قوی (SO_4+Cl) برای تمامی نمونه‌ها بیش‌تر از اسیدهای ضعیف (CO_3+HCO_3) می‌باشند. تنها در مورد یک منبع آبی، اسیدهای ضعیف بیش‌تر از اسیدهای قوی هستند. در اکثر نمونه‌ها، قلیایی‌های خاکی ($Ca+Mg$) بیش‌تر از قلیایی‌ها ($Na+K$) بوده و برخی از نمونه‌ها قلیایی‌ها بیش‌تر از قلیایی‌های خاکی می‌باشند. به‌طور کلی بر اساس نتایج حاصل از نمودار پایپر، آب زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز بافق در دسته‌ی آب قلیایی با غالبیت کلر یا سولفات قرار می‌گیرد.

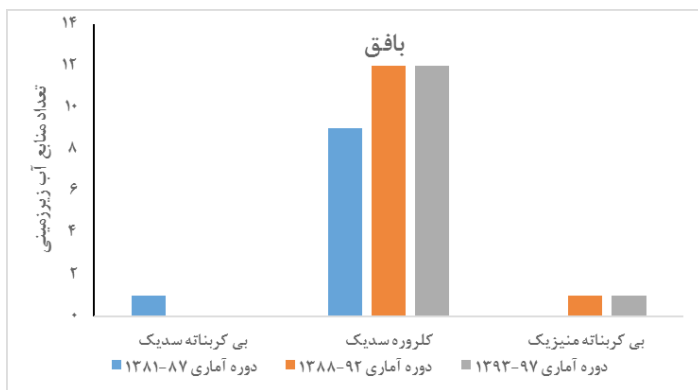
نتایج تحلیل توالی غالبیت یون‌ها و تیپ و رخساره‌ی آب برای هر یک از منابع آب زیرزمینی موجود در حوزه‌ی آبخیز بافق در جدول‌های ۲ تا ۴ برای دوره‌های زمانی مختلف ارائه‌شده است. بر این اساس، طی بازه‌های زمانی ۱۳۸۱-۸۷ و ۱۳۸۸-۹۲، در ۹۰



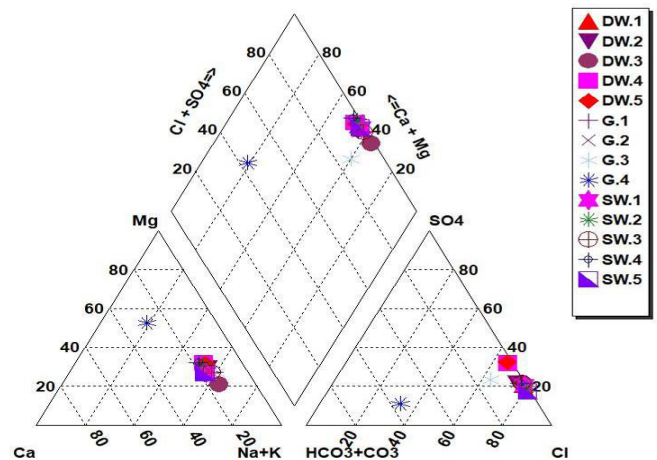
شکل ۳: نمودار پایپر در حوزه‌ی آبخیز بافق - دوره‌ی آماری ۱۳۸۸-۹۲



شکل ۲: نمودار پایپر در حوزه‌ی آبخیز بافق - دوره‌ی آماری ۱۳۸۱-۸۷



شکل ۵: فراوانی تیپ و رخساره‌ی آب زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز بافق طی دوره‌های آماری مختلف



شکل ۴: نمودار پایپر در حوزه‌ی آبخیز بافق - دوره‌ی آماری ۱۳۹۳-۹۷

جدول ۲: طبقه‌بندی تیپ و رخساره‌ی منابع آب زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز بافق- دوره‌ی آماری ۸۷-۱۳۸۱

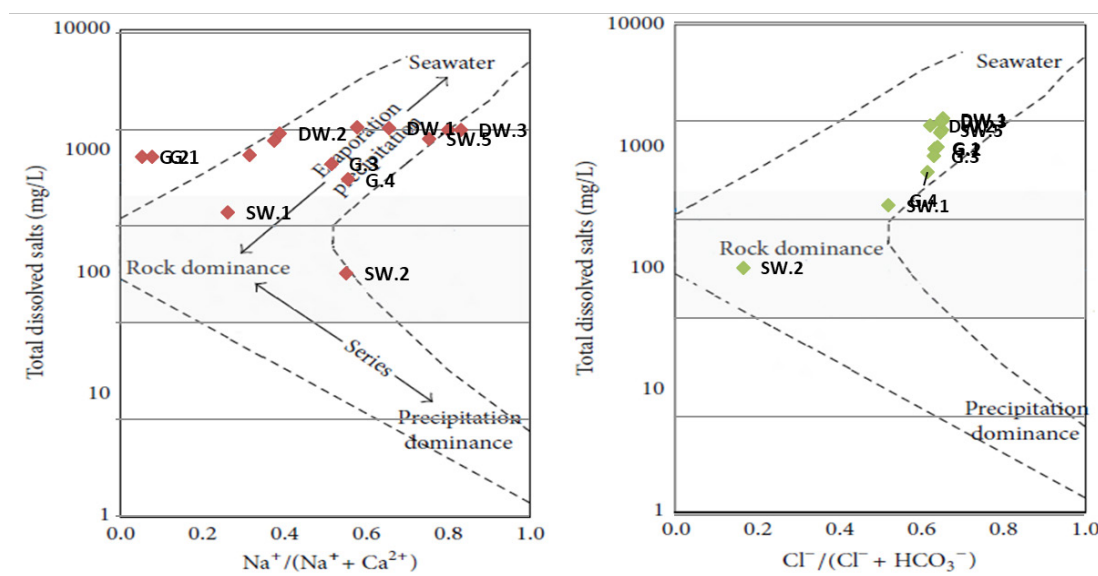
منبع آب	غلظت آنیون‌ها	غلظت کاتیون‌ها	تیپ آب	رخساره آب	تیپ و رخساره	نحوه توسعه تیپ و رخساره
DW.1	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
DW.2	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Mg > Ca	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
DW.3	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
G.1	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
G.2	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
G.3	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Mg > Ca	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
G.4	HCO ₃ > Cl > SO ₄	Na+K > Ca > Mg	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
SW.1	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
SW.2	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
SW.5	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی

جدول ۳: طبقه‌بندی تیپ و رخساره‌ی منابع آب زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز بافق- دوره‌ی آماری ۹۲-۱۳۸۸

منبع آب	غلظت آنیون‌ها	غلظت کاتیون‌ها	تیپ آب	رخساره آب	تیپ و رخساره	نحوه توسعه تیپ و رخساره
DW.1	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
DW.3	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Mg > Ca	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
G.1	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Mg > Ca	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
G.2	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
G.3	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Mg > Ca	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
G.4	HCO ₃ > Cl > SO ₄	Na+K > Mg > Ca	بی کربناته	سدیک	بی کربناته سدیک	توسعه انتقالی
SW.1	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
SW.2	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
SW.5	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه اساسی
SW.5	Cl > HCO ₃ > SO ₄	Na+K > Ca > Mg	کلروره	سدیک	کلروره سدیک	توسعه انتقالی

جدول ۴: طبقه‌بندی تیپ و رخساره‌ی منابع آب زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز مطالعاتی بافق- دوره‌ی آماری ۹۷-۱۳۹۳

منبع آب	غلظت آنیون‌ها	غلظت کاتیون‌ها	تیپ آب	رخساره آب	تیپ و رخساره	نحوه توسعه تیپ و رخساره
DW.2	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Mg > Ca	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
DW.3	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Ca > Mg	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
DW.4	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Mg > Ca	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
DW.5	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Mg > Ca	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
G.1	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Mg > Ca	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
G.2	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Mg > Ca	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
G.3	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Mg > Ca	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
G.4	HCO3 > Cl > SO4	Mg > Ca > Na+K	بی کربناته	منیزیک	بی کربناته منیزیک	توسعه انتقالی
SW.1	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Ca > Mg	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
SW.2	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Mg > Ca	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
SW.3	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Mg > Ca	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
SW.4	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Mg > Ca	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی
SW.5	Cl > SO4 > HCO3	Na+K > Ca > Mg	کلروه	سدیک	کلروه سدیک	توسعه اساسی



شکل ۶: نمودار گیبس در حوزه‌ی آبخیز بافق طی دوره‌ی آماری ۹۷-۱۳۸۱

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بررسی تیپ و رخساره‌ی آب زیرزمینی توسط نمودار پایپر در حوزه‌ی آبخیز بافق نشان داد سولفات، به‌عنوان آنیون غالب و سدیم، به‌عنوان کاتیون غالب شناسایی شده است. این در حالی است که منابع آب زیرزمینی در بخشی از حوضه بدون تیپ غالب می‌باشند. بر این اساس، منابع آب زیرزمینی در سطح حوضه دارای تیپ و رخساره‌ی Na-Cl (کلروه سدیک) و Mg-HCO3 (بی کربنات منیزیک) می‌باشند که با یافته‌های تانگ و همکاران [۲۵]، هم‌راستا می‌باشد. این در حالی است که مقیمی [۱۹] و سلطانی و

بررسی عوامل کنترل‌کننده‌ی کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی توسط نمودارهای گیبس و ترکیبی

در حوزه‌ی آبخیز بافق، موقعیت نمونه‌ها بر روی نمودار گیبس حاکی از تأثیر تبخیر بر روی کیفیت آب زیرزمینی در درجه‌ی اول و سپس انحلال و هوازدگی سنگ در درجه‌ی دوم می‌باشد (شکل ۶). همان‌طور که مشخص است تقریباً اکثر نمونه‌ها در محدوده‌ی عامل تبخیر قرار گرفتند؛ درحالی‌که تعداد نمونه‌ها در محدوده‌ی هوازدگی و انحلال سنگ، حاکی از تأثیر کم‌تر این عامل نسبت به تبخیر بر روی کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی می‌باشد.

همکاران [۲۲]، در دشت ساری- قائم‌شهر و آبخوان دشت کردکندی آذربایجان شرقی گزارش دادند که به ترتیب تیپ‌های CaHCO_3 و Ca-Cl-Mg غالب در منطقه می‌باشد. هم‌چنین بای و همکاران [۳]، گزارش داد که میزان کاتیون سدیم در منطقه مورد مطالعه نسبت به سایر کاتیون‌ها غالب بوده است. نتایج حاصل از ترسیم نمودار گیبس نشان داد، دو عامل تبخیر و انحلال و هوازدگی سنگ از جمله عوامل تأثیرگذار بر کیفیت شیمیایی آب می‌باشند که از بین این دو عامل، تأثیر عامل تبخیر، نسبت به عامل انحلال و هوازدگی سنگ، بیش‌تر است. در واقع تبخیر، مهم‌ترین عامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی بوده و انحلال و هوازدگی سنگ، در درجه‌ی دوم اهمیت قرار می‌گیرد.

نتایج ترسیم نمودارهای ترکیبی نشان داد اکثریت یون سدیم موجود در منابع آب زیرزمینی حوزه‌ی آبخیز بافق از غلظت کم‌تری نسبت به یون کلر برخوردار است که نشان‌دهنده‌ی تبادل یونی معکوس می‌باشد. در این شرایط ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی ناشی از نفوذ آب‌های شور به سمت منبع آب می‌باشد. به‌طور کلی نتایج این بخش از پژوهش نشان داد تبخیر عامل اصلی کنترل‌کننده شوری آب زیرزمینی بوده و انحلال هالیت در کنار تبخیر بر شدت شوری آب زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز بافق افزوده است. نتایج بررسی منشأ یون کلر نشان داد بالا بودن غلظت کلر در آب زیرزمینی ممکن است به دلیل نفوذ آب‌شور به سفره باشد که می‌تواند ناشی از انحلال سنگ‌های تبخیری از جمله هالیت بوده که در کنار عامل تبخیر سبب افزایش شوری آب زیرزمینی شده است. نمودار مقادیر نسبت Ca/Mg برای نمونه‌های آب زیرزمینی نشان داد منشأ اصلی انحلال و هوازدگی سنگ در این حوضه ناشی از انحلال کلسیت و سپس دولومیت می‌باشد. نمودار مقادیر $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{SO}_4)$ نشان داد غلظت یون کلسیم نسبت به سولفات کم‌تر می‌باشد که دلیل آن فرایند تبادل یونی و یا رسوب کلسیم به صورت کلسیت می‌باشد. هم‌چنین نمودار نسبت یونی SO_4/Ca نیز بیانگر بالاتر بودن غلظت سولفات نسبت به کلسیم در حوزه‌ی آبخیز بافق است و کلسیم موجود در آب، به دلیل رسوب‌گذاری از غلظت آن کاسته شده است. در بخش دیگری از حوضه، مقدار کلسیم موجود در آب بیش‌تر از سولفات بوده که ناشی از انحلال کلسیت، دولومیت یا سیلیکات در آب می‌باشد. درصد کم‌تری نیز دارای مقدار کلسیم و سولفات تقریباً برابر می‌باشند که حاکی از انحلال ژپس در آب زیرزمینی است.

یافته‌های این پژوهش نشان داد همبستگی بالایی میان مجموع کاتیون‌ها و آنیون‌ها وجود دارد که بیانگر وجود منبع مشترک انحلال نمک‌ها می‌باشد. نمودار مقادیر نسبت یونی Na و $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Cl})$ کاهش غلظت یون سدیم و غالبیت تبادل یونی معکوس را در حوضه تأیید کرد. دلیل این کاهش، ناشی از وجود مارن در مسیر جریان آب زیرزمینی است. این در حالی است که در بخشی از نمونه‌ها، بالا بودن غلظت یون سدیم تأیید شد؛ که دلیل این افزایش، ناشی از تبادل کاتیونی و جانشینی یون کلسیم و منیزیم محلول در آب

زیرزمینی در کانی رس می‌باشد. نمودار مجموع کاتیون‌ها در مقابل مجموع سدیم و پتاسیم نشان داد یون‌های سدیم و پتاسیم از هوازدگی سیلیکات منشأ می‌گیرند. هم‌چنین نمودار مجموع منیزیم و کلسیم در مقابل مجموع کاتیون‌ها نشان از پایین بودن غلظت منیزیم و کلسیم می‌باشد که این مورد می‌تواند ناشی از واکنش‌های تفویض یونی میان کلسیم، منیزیم و سدیم باشد. نمودار مقادیر $(\text{SO}_4 + \text{HCO}_3)$ - $(\text{Mg} + \text{Ca})$ در مقابل Na-Cl ، بیانگر تأثیر قابل‌ملاحظه‌ی تبادل یونی بر کیفیت شیمیایی آب در حوضه می‌باشد. مقادیر شاخص کلروالکالین نشان داد نوع تبادل یونی در حوزه‌ی آبخیز بافق از نوع تبادل یونی معکوس بوده که تبادل بین منیزیم یا کلسیم با سدیم یا پتاسیم می‌باشد. هم‌چنین نمودار مقادیر بی‌کربنات در مقابل مجموع کاتیون‌ها (سدیم، منیزیم، کلسیم) و نمودار نسبت یونی $\text{So}_4 + \text{Cl}/\text{Hco}_3$ در مقابل TDS نشان داد آب زیرزمینی در این حوزه‌ی آبخیز، تحت تأثیر قابل توجه فعالیت‌های انسانی و کشاورزی می‌باشد [۲۱].

با توجه به موارد فوق، نتیجه‌گیری کلی این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- در بین کاتیون‌ها یون سدیم و در بین آنیون‌ها یون سولفات، بیش‌ترین غلظت را دارا می‌باشند.

- تیپ و رخساره‌ی غالب آب زیرزمینی در حوزه‌ی آبخیز بافق، کلروره سدیک می‌باشد.

- نتایج حاصل از نمودارهای ترکیبی نشان می‌دهند که فرایند تبخیر، انحلال هالیت، تعویض کاتیونی، هوازدگی و انحلال سنگ‌ها و کانی‌ها، به‌ویژه کربنات‌ها چون کلسیت، دولومیت و به مقدار کم‌تر ژپس و سیلیکات‌ها و هم‌چنین فعالیت‌های کشاورزی و نفوذ آب‌های شور برگشتی حاصل از کشاورزی، از عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی هستند.

سپاسگزاری

این اثر بر گرفته از بخشی از نتایج پروژه‌ی تحقیقاتی با عنوان "مطالعه‌ی کیفیت منابع آب زیرزمینی با تأکید بر مصارف شرب، آبیاری و صنعت در حوزه‌ی آبریز کویر درانجیر"، مصوب در مؤسسه‌ی تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور با کد ۹۹۰۵۴۲-۹۹۰۲۵-۹۹۰۲۹-۰۹-۰۹-۰۱ می‌باشد. نویسندگان این مقاله بر خود فرض می‌دانند از همکاری و پشتیبانی آن مؤسسه سپاسگزاری و قدردانی نمایند.

منابع

1. Arom. Z., Forghani Tehrani, G., and Kazami. A. 2018. Investigation of Hydrogeochemistry and quality of Groundwater in the Aquifer of Bukan Plain, West Azerbaijan Province. *Advanced Applied Geology*, 8(1), 13-32. (In Persian).
2. Azizi, F., Arjomand, H., MoradiNejad, T., and

12. Hassanzadeh, N. M., and Khajebafghi, H. 2017. Flood Hazard Zoning Using Multiple Criteria Decision Analysis System (Case Study: Sheytoor Watershed in Bafgh). *Journal of Watershed Management Research*, 7(14), 37-29. (In Persian).
13. Jafarian, H., Vaezihir, A., and Pirkharrati, H. 2018. The Determination of the Influential Parameters in Hydrochemistry of Hard Rocks and Karstic Groundwater in the West of Urmia, Iran. *Hydrogeomorphology*, 5(1), 75-94. (In Persian).
14. Jia, H., Qian, H., Zheng, L., Feng, W., Wang, H., A., Gao, Y. 2020. Alterations to groundwater chemistry due to modern water transfer for irrigation over decades. *Science of the Total Environment*, 717, 137170.
15. Ismail, E., Snousy, M. G., Alexakis, D. E., Abdelhalim, A., Ahmed, M. S., A., Elsayed, E. 2023. Diagnosis of Groundwater Quality in North Assiut Province, Egypt, for Drinking and Irrigation Uses by Applying Multivariate Statistics and Hydrochemical Methods. *Water*, 15(15), 2812.
16. Kalantari, N., Rahimi, M.H., and Churchy, A. 2007. Use of Composite Diagrams, Factor Analysis and Saturation Index for Quantification of Zeviercherry & Kheran Groundwater Plains. *Journal of Engineering Geology*, 2(1), 339-356. (In Persian).
17. Liu, J., Gao, Z., Wang, Z., Xu, X., Su, Q., Wang, S., Qu, W., and Xing, T. 2020. Hydrogeochemical processes and suitability assessment of groundwater in the Jiaodong Peninsula, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-17.
18. Merino, L. M., Aguilera, H., González-Jiménez, M., and Díaz-Losada, E. 2021. D-Piper, a modified piper diagram to represent big sets of hydrochemical analyses. *Environmental Modelling & Software*, 138, 104979.
19. Moghimi, H. 2015. Assessment of Hydrochemical Characteristics of Groundwater Resources of the aquifer of the Sari-Ghaemshahr plain for Drinking and Irrigation Purposes. *Water Resources Engineering*, 8(26), 51-68. (In Persian).
20. Ravikumar, P., Somashekar, R. K., and Prakash, K. L. 2015. A comparative study on usage of Durov and Piper diagrams to interpret hydrochemical processes Khazaei, M. 2020. Evaluation of Groundwater Hydrogeochemical Characteristics in Basht Plain Aquifer and its Suitability using Qualitative Indicators. *Extension and Development of Watershed Management*, 8(28), 57-65. (In Persian).
3. Bai, X., Tian, X., Li, J., Wang, X., Li, Y., and Zhou, Y. 2022. Assessment of the Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanisms of Groundwater in a Typical Alluvial-Proluvial Plain in China: An Example from Western Yongqing County. *Water*, 14(15), 2395
4. Chen, Z., Grasby, S., and Osadetz, K.G. 2004. Relation between climate variability and groundwater level in the upper carbonate aquifer, south Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology*, 290: 62-43.
5. Elshorbagy, A., and Ormsbee, L. 2006. Object-oriented modeling approach to surface water quality management. *Environmental Modelling & Software*, 21(5), 689-698.
6. Esmaeili, S., Barzegar, R., and Kazemian, N. 2018. The effective factors on the groundwater chemical quality of Qareh-Ziaeddin plain, West Azarbaijan province. *Journal of Geosciences*, 27(108), 245-256. (In Persian).
7. Faryabi, M., Kalantari, N., and Negarestani, A. 2010. Evaluation of factors influencing groundwater chemical quality using statistical and hydrochemical methods in Jiroft plain. *Journal of Geosciences*, 20(77), 115-120. (In Persian).
8. Gabr, M. E., Soussa, H., and Fattouh, E. 2021. Groundwater quality evaluation for drinking and irrigation uses in Dayrout city Upper Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 327-340.
9. Gibbs, R. J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088-1090.
10. Gholamdokht Bandari M, Rezaee P, and Gholamdokht Bandari Z. 2018. Assessment of the hydrogeochemical quality of underground in the Siahoo region, northeast of Bandar Abbas. *Iranian Journal health and environment*, 11 (1), 97-110. (In Persian).
11. Gupta, S., Mahato, A., Roy, P., Datta, J. K., and Saha, R. N. 2008. Geochemistry of groundwater, Burdwan District, West Bengal, India. *Environmental Geology*, 53, 1271-1282.

25. Tong, X., Tang, H., Gan, R., Li, Z., He, X., and Gu, S. 2022. Characteristics and causes of changing groundwater quality in the boundary line of the middle and lower Yellow River (right bank). *Water*, 14(12), 1846.
26. Yang, J., Liu, H., Tang, Z., Peeters, L., and Ye, M. 2022. Visualization of aqueous geochemical data using python and WQChartPy. *Groundwater*, 60(4), 555-564.
27. Zhang, C., Li, X., Ma, J., Wang, Z., and Hou, X. 2022. Stable isotope and hydrochemical evolution of shallow groundwater in mining area of the Changzhi Basin, northern China. *Environmental Earth Sciences*, 81(10), 294.
- in groundwater from SRLIS river basin, Karnataka, India. *Earth Science*, 80(2015), 31073-31077.
21. Reddy, A. G. S., Saibaba, B., and Sudarshan, G. 2012. Hydrogeochemical characterization of contaminated groundwater in Patancheru industrial area, southern India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 3557-3576.
22. Soltani, S., Asghari Moghaddam, A., Barzegar, R., and Kazemian, N. 2017. Identifying Effective Processes on Groundwater Chemistry of the KordkandiDuzdudan Plain Aquifer. *Journal of Water and Soil*, 27(2), 77-89.
23. Shyam, R., Krishan, G., Kheraj, and Kumar, A. 2022. Evaluation of groundwater quality for life-supporting activities: a case study of Haryana, India. *International Journal of River Basin Management*, 1-12.
24. Taoufiq, L., Kacimi, I., Saadi, M., Nouayti, N., Kassou, N., Bouramtane, T., A., El-Mouhdi, K. 2023. Assessment of Physicochemical and Bacteriological Parameters in the Angads Aquifer (Northeast Morocco): Application of Principal Component Analysis and Piper and Schoeller–Berkaloff Diagrams. *Applied and Environmental Soil Science*, 2023.



Abstract

Analysis of Changes in Water Quality Chemical Parameters in the Bafgh Watershed

S.M. Soleimanpour¹, S. Lotfinasab², O. Rahmati³ and M. Motamednia⁴

Received: 2025/07/07 Accepted: 2025/08/10

Groundwater is the primary source of water for domestic, agricultural and industrial use in many countries, and its quality reduction is recognized as one of the most serious problems. The quality of underground water depends on the nature of bedrock, topography, geology, soil, climate, atmospheric precipitation and the quality of fed water and sources of human pollution in terms of agricultural and industrial activities. In addition, groundwater quality can be affected by subsurface geochemical reactions such as weathering, dissolution, precipitation, ion exchange, and various biological processes. For this purpose, the current research was conducted with the aim of investigating the chemical water quality of Bafgh watershed. The necessary data and information on the chemical quality of underground water sources were obtained by referring to the Iranian Water Resources Research Organization and the Regional Water Organization of Yazd and Kerman Provinces in a joint statistical period of 17 years from the water year 2002-2003 to the water year 2017-2018. In order to determine the type of water, the sequence of the dominance of anions and cations, and to determine the hydrochemical processes and chemical compositions of water, Piper's diagram has been used. By using composite and Gibbs diagrams, the type and facies of underground water were determined and their causes were investigated. The results of the Piper diagram showed that the dominant type and facies in the basin is of the Sodic chloride type, which indicates the salinity of the underground water in this area. The results of the composite diagrams show that the process of evaporation, dissolution of halite, cation exchange, weathering and dissolution of rocks and minerals, especially carbonates such as calcite, dolomite and to a lesser extent gypsum and silicates, also, agricultural activities and the infiltration of return saline water from agriculture are factors affecting the chemical quality of underground water.

Keywords: Agriculture, Piper diagram, Quality, Sources of pollution, Water surface.

1. Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran. * Corresponding Author's E-mail: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

2. Assistant Professor, Desert Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

3. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran.

4. Ph.D., Natural Resources and Watershed Management Department, Bafgh County, Yazd Province, Iran.