

هیدروژئوشیمی و ارزیابی کیفی منابع آب موجود در رسوبات کواترنر جنوب شرق فاروج (خراسان شمالی) از نظر مصارف آشامیدن و صنعتی

زهرة خسروانی شیرینی؛ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
محمدحسین محمودی قرآنی*؛ دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
سید احمد مظاهری؛ استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۲

چکیده

در این مطالعه بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت فاروج از نظر آشامیدن و صنعت انجام شد. بدین منظور، ۱۲ نمونه آب زیرزمینی از آبخوان رسوبات کواترنر منطقه برداشت شد. پارامترهای حرارت (T)، pH و هدایت الکتریکی (EC) هنگام نمونه برداری و در محل اندازه گیری شد. آنالیز آنیون ها (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) و کاتیون های اصلی (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+) در آزمایشگاه شیمی تجزیه دانشگاه فردوسی مشهد اندازه گیری شد. ترکیب شیمیایی نمونه های آب بر اساس نمودار پایپر Na-Cl و Na-SO_4 به دست آمده است. با استفاده از نمودار پایپر می توان به واحدهای سنگی اثرگذار در ترکیب شیمیایی آب نیز پی برد. بر پایه نتایج به دست آمده، کاتیون غالب در نمونه ها سدیم و آنیون های غالب سولفات و کلر است. منشأ یون سدیم را می توان علاوه بر کانی های تبخیری به انحلال آلبیت موجود در آندزیت های منطقه، همچنین تبادل یونی نسبت داد. منشأ یون سولفات و کلر نیز با سازندهای نئوژن منطقه مرتبط است. ترکیب شیمیایی آب ها با توجه به نوع رسوبات ابرفتی کواترنر در آبخوان دشت فاروج که بخشی از آن حاصل فرسایش نهشته های نئوژن در بردارنده لایه های تبخیری است منطقی به نظر می رسد. نمودار گیبس نشان داد که فرایندهای اصلی کنترل کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت فاروج هر دو فرایند تبخیر و برهم کنش آب و سنگ است و به سمت مرکز و خروجی آبخوان کیفیت کاهش می یابد. با استفاده از شاخص رایزرنر، شاخص پوکوریوس و شاخص تهاجمی، خوردگی و رسوب دهی آب پایش و مشخص شد نمونه های مورد مطالعه از لحاظ مصارف صنعتی کاملاً نامناسب است، زیرا اکثر نمونه های آب منطقه رسوبگذار است.

واژه های کلیدی: آلودگی آب، خوردگی و رسوب گذاری، رسوبات کواترنر، نمودار گیبس، نهشته های نئوژن.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی منبع اصلی آب آشامیدنی و برای فعالیتهای خانگی، کشاورزی، صنعتی، تفریحی و محیط زیستی است (سلواکومار، ۲۰۱۷: ۲۶). شیمی آب های زیرزمینی تا حد زیادی تابع ترکیب کانی شناسی سازندی است که ضمن عبور از آن در نتیجه واکنش آب با سنگ، به تعادل می رسد. طی حرکت آب های زیر زمینی واکنش های شیمیایی مختلفی رخ می دهد. این واکنش های زیرزمینی از نظر زمانی و مکانی متنوع است و به شیمی اولیه آب، سازندهای زمین شناسی و زمان ماندگاری بستگی دارد (سرکار و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۲۹).
فعالیت های انسان زاد نیز مانند فرایندهای طبیعی سامانه، جریان آب های زیرزمینی را از راه آلوده کردن یا تغییر

چرخه‌های آب‌شناختی تحت تأثیر قرار می‌دهد. عناصر محلول در آب راهنمای مناسبی برای درک شرایط زمین‌شناسی منطقه، از جمله تأثیر بستر، حضور کانسارهای کشف‌نشده و حتی شناسایی کانی‌های مختلفی است که در سطح زمین رخمون نیافته است (تاج‌بخشیان و همکاران، ۱۳۹۴: ۷۱). هرچند شدت عوامل طبیعی و انسانی در زمان و مکان متفاوت است، تأثیرات خود را در هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی منعکس می‌کند (نعمت‌الهی و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۰۲۲).

بررسی نقشه زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد رسوبات کواترنری بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد که متشکل از مواد ریز تا متوسط است (نادری میقان، ۱۳۸۵) و به علت وسعت نسبتاً زیاد، بهترین محل تغذیه آبخوان است. به دلیل نفوذپذیری زیاد این واحدها ممکن است آب‌های شور در آن نفوذ کند و مخازن آب با کیفیت شور را تشکیل دهد.

یکی از فاکتورهای مهم در بحث کنترل کیفیت شیمیایی منابع آب آشامیدنی مسئله خوردگی و رسوب‌گذاری آب است. خوردگی از طریق واکنش شیمیایی بین فلز و محیط اطراف صورت می‌گیرد و باعث تغییر کیفیت آب می‌شود. خوردگی باعث حل شدن دیواره لوله‌ها و رهاشدن فلزات از جنس لوله به داخل سیال انتقالی می‌شود. اگر خوردگی به سرعت اتفاق بیفتد، باعث ایجاد حفره در لوله و در نهایت سوراخ شدن آن می‌شود که هنگام مکش منفی باعث ورود آلاینده‌ها به داخل لوله می‌شود و اگر آب تمایل به رسوب‌گذاری داشته باشد، به تدریج با ایجاد لایه‌های رسوب در قسمت داخلی لوله باعث کم شدن قطر داخلی آن و در نهایت کاهش جریان آب داخل لوله می‌شود (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۶: ۷۶). خوردگی و رسوب‌گذاری آب نه تنها تأثیر منفی بر مصارف صنعتی دارد، بلکه برای سلامت انسان نیز مضر است (رضایی کلانتری و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۲۸). از این رو، در این مطالعه به وضعیت آبخوان دشت فاروج از نظر کیفیت آب برای مصارف آشامیدن و صنعتی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

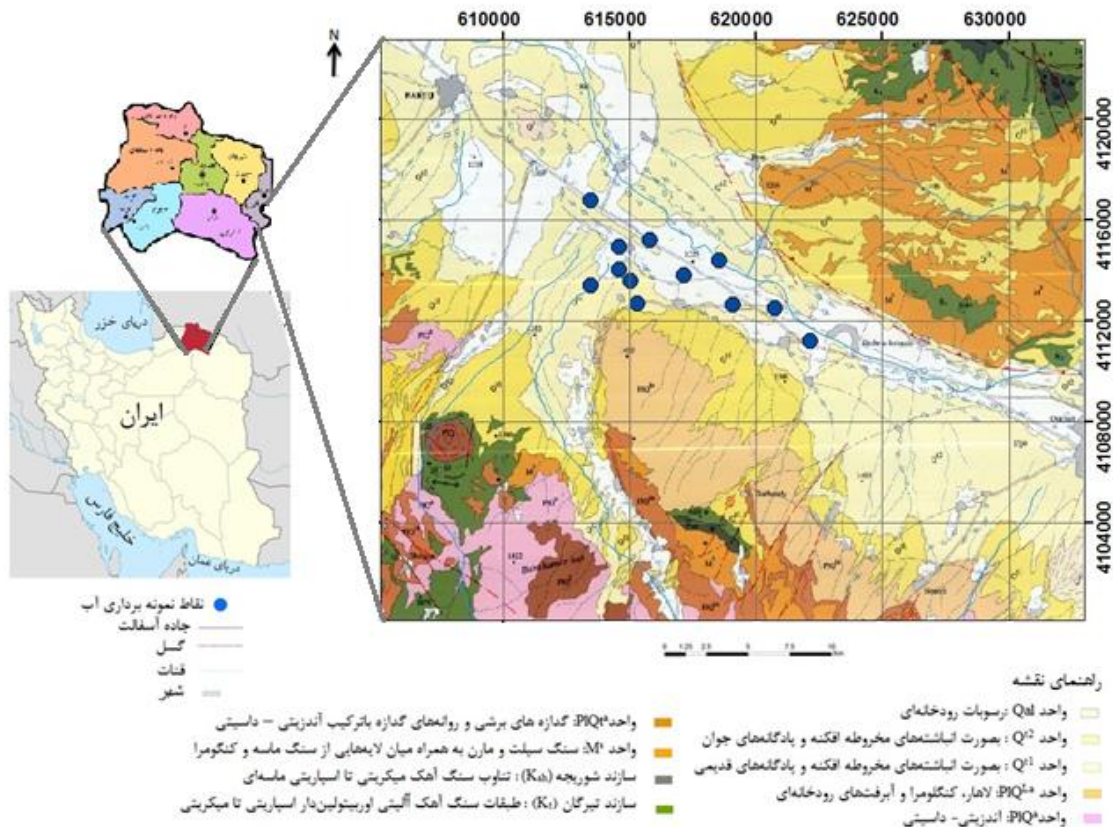
منطقه مورد مطالعه در شمال شرق ایران، استان خراسان شمالی و در محدوده طول‌های شرقی $45^{\circ} 58'$ الی $15^{\circ} 58'$ و عرض‌های شمالی $25^{\circ} 37'$ الی $99^{\circ} 36'$ قرار دارد (شکل ۱). گستره مورد مطالعه بخشی از پهنه زمین‌شناختی - ساختمانی کپه‌داغ به‌شمار می‌آید که در شمال کوه‌های بینالود واقع شده است. دشت آبرفتی فاروج از رسوبات کواترنری روی سنگ کف نئوژن تشکیل شده است. این دشت غنی‌ترین زون هیدروژئولوژیکی دشت قوچان - شیروان است. نهشته‌های کواترنری Q^1 به صورت انباشته‌های مخروط‌افکنه و پادگانه‌های قدیمی در دامنه‌های پرشیب روی واحدهای سنگی گسترده شده است (شکل ۱). ذرات متشکل از این انباشته‌ها حاصل فرسایش طبقات سنگی بلندی‌های پیرامون است. واحد Q^2 با گسترش محدود به صورت انباشته‌های مخروط‌افکنه و پادگانه‌های جوان در دامنه‌های کم‌شیب و حوالی نواحی مزروعی و مسیله‌ها وجود دارد. بیشتر زمین‌های کشاورزی روی همین واحد توسعه یافته است. رسوبات آواری قرمز رنگ نئوژن (واحد M^s) شامل سنگ سیلت و مارن به همراه میان‌لایه‌هایی از سنگ ماسه و کنگومراست که به رنگ قرمز روشن برونزد دارد. سازند کربناته تیرگان در منطقه مورد مطالعه از طبقات سنگ آهک آلیتی اوریتولین‌دار اسپاریتی تا میکربیتی و سنگ‌آهک تخریبی متوسط تا ضخیم لایه (۰/۵ تا ۲ متر)، به همراه میان‌لایه‌های سنگ آهک رسی / شیل آهکی به رنگ خاکستری تشکیل شده است. رخمون‌های ولکانیکی آندزیتی و داسیتی و رسوبات رودخانه‌ای گسترده‌ترین واحدهای زمین‌شناسی در منطقه جنوب شرق فاروج است (نادری میقان، ۱۳۸۴). جهت جریان آب از ورودی آبخوان در جنوب شرق به طرف شمال غرب و در واقع خروجی آبخوان است.

نمونه‌برداری از ۱۲ منبع آب (چاه) منطقه قره‌شاهوردی واقع در جنوب شرق فاروج در آبان ۱۳۹۵ انجام شد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری از منابع آب در شکل ۱ آمده است. پارامتر دما (T)، هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته آب (pH) در محل اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری آنیون‌ها به روش تیتراسیون و کاتیون‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (AAS) در آزمایشگاه شیمی تجزیه دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. تعیین تیپ آب و نمودارهای هیدروژئوشیمیایی نمودار پایپر^۲

1. Atomic Absorption Spectrophotometer
2. Piper

دورو^۱ و پارامترهای آماری نیز با نرم افزارهای Aq.Qa 1.1.1 و SPSS.16 انجام شد. بررسی ارزیابی کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت فاروج برای مصارف گوناگون شرب و صنعتی شاخص لانتلیه^۲ با استفاده از نرم افزار Chemistry صورت گرفت. به منظور کیفیت آب برای مصارف آشامیدن، از دیاگرام شولر^۳ در محیط نرم افزار Chemistry استفاده شد. شاخص پوکوریوس^۴، شاخص رایزنر^۵ و شاخص تهاجمی^۶ در اکسل محاسبه و نمودار گیس در اکسل ترسیم شد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت نمونه برداری (برگرفته از نادری میقان، ۱۳۸۴)

نتایج

نتایج حاصل از اندازه گیری پارامترها و آنالیزهای فیزیکی-شیمیایی یون‌های اصلی در جدول ۱ آمده است. مقدار EC از ۲۰۶۲ تا ۸۰۹۴ pH از ۷/۵۸ تا ۷/۹۸ و دما از ۱۲ تا ۱۸/۹۰ درجه سانتی گراد در تغییر بود. مقدار آنیون‌ها، HCO_3^- ، SO_4^{2-} و Cl^- به ترتیب از ۴۴/۴۹ تا ۳۶۰۰، ۱۱۷/۴۰ تا ۴۲۴/۴۰، ۱۶۶/۵۰ تا ۱۹۰۰ میلی گرم بر لیتر در تغییر بود. غلظت کاتیون‌ها، Ca^{2+} و Na^+ ، Mg^{2+} ، K^+ به ترتیب ۳۰/۵۳ تا ۲۵۷/۹۰، ۶/۴۹ تا ۱۳/۵۳، ۱۷۴/۹۰ تا ۱۱۳۲ و ۵۸/۶۶ تا ۳۴۹/۸۰ میلی گرم بر لیتر در تغییر بود (جدول ۱).

1. Durov
2. Langelier's Index
3. Schoeller Diagram
4. Puckorius scaling index
5. Ryznar Index
6. Aggressiveness index

جدول ۱. خلاصه آماری مربوط به پارامترهای فیزیکی-شیمیایی اندازه گیری شده (یون ها بر حسب میلی گرم بر لیتر و EC بر حسب $\mu\text{mho/cm}$)، منابع آب جنوب شرقی فاروج (n=۱۲)

پارامترها	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
T	۱۲/۰۰	۹۰/۱۸	۱۶/۳۳	۱/۸۹
pH	۷/۵۸	۷/۹۸	۷/۷۸	۰/۱۲
EC	۲۰/۶۲	۰۰/۸۰۹۴	۲۹۸۵	۲۳۹۲/۴۰
TDS	۷۳۵/۱۲	۵۰/۷۳۷۰	۲۶۳۹/۹	۱۷۷۵/۲۶
Ca	۵۸/۶۶	۳۴۹/۸۰	۱۴۰/۸۱	۸۲/۳۳
Mg	۳۰/۹۳	۲۵۷/۹۰	۱۰۵/۴۷	۶۳/۸۷
Na	۱۷۴/۹۰	۰۰/۱۱۳۲	۴۷۴/۴۳	۲۸۵/۴۹
K	۶/۴۹	۱۳/۵۳	۹/۰۵	۲/۳۰
CO ₃	۰۰/۰	۹۹/۲	۱۸/۰	۷۲/۰
HCO ₃	۱۱۷/۴۰	۴۲۴/۴۰	۲۶۷/۱۹	۱۰۸/۵۱
Cl	۱۶۶/۵۰	۰۰/۱۹۰۰	۶۳۷/۲۲	۵۷۹/۳۶
SO ₄	۴۴/۴۹	۰۰/۳۶۰۰	۱۰۰۰/۵۷	۸۹۶/۴۱

بحث

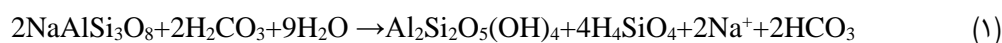
ترکیب شیمیایی منابع آب برداشت شده

ترکیب شیمیایی آب های زیرزمینی حین عبور از محیط های زمین شناسی مختلف تغییر و تحول می یابد و در این فرایند غلظت آنیون ها و کاتیون ها افزایش یا کاهش دارد. تیپ آب بر اساس اولویت غلظتی یکی از آنیون ها و رخساره ها بر اساس اولویت غلظتی یکی از کاتیون ها تعیین می شود. به طور کلی، آب ها از نظر ترکیب شیمیایی به سه تیپ اصلی بیکربناته، سولفات و کلره تقسیم می شود که هر کدام سه رخساره کلسیک، منیزیک و سدیک (سدیم و پتاسیم) دارد.

برای تعیین رخساره های آب زیرزمینی از نمودار پایپر استفاده می شود. این نمودار در تعیین نوع آب ها، رخساره های هیدروشیمیایی، بررسی ترکیب و وضعیت هیدروژئوشیمیایی با نمایش تعداد زیادی نمونه در دیاگرام، مسیر تکامل هیدروژئوشیمیایی، نشان دادن تفاوت ها و شباهت ها بین نمونه های آب، تأثیر اختلاط بین آب های مختلف و نیز بررسی تغییرات مکانی نمونه های برداشت شده از منابع آب منطقه استفاده می شود (پایپر، ۱۹۴۴:۹۲۴). ترکیب شیمیایی نمونه های آب بر اساس نمودار پایپر Na-Cl و Na-SO₄ بود (شکل ۲الف).

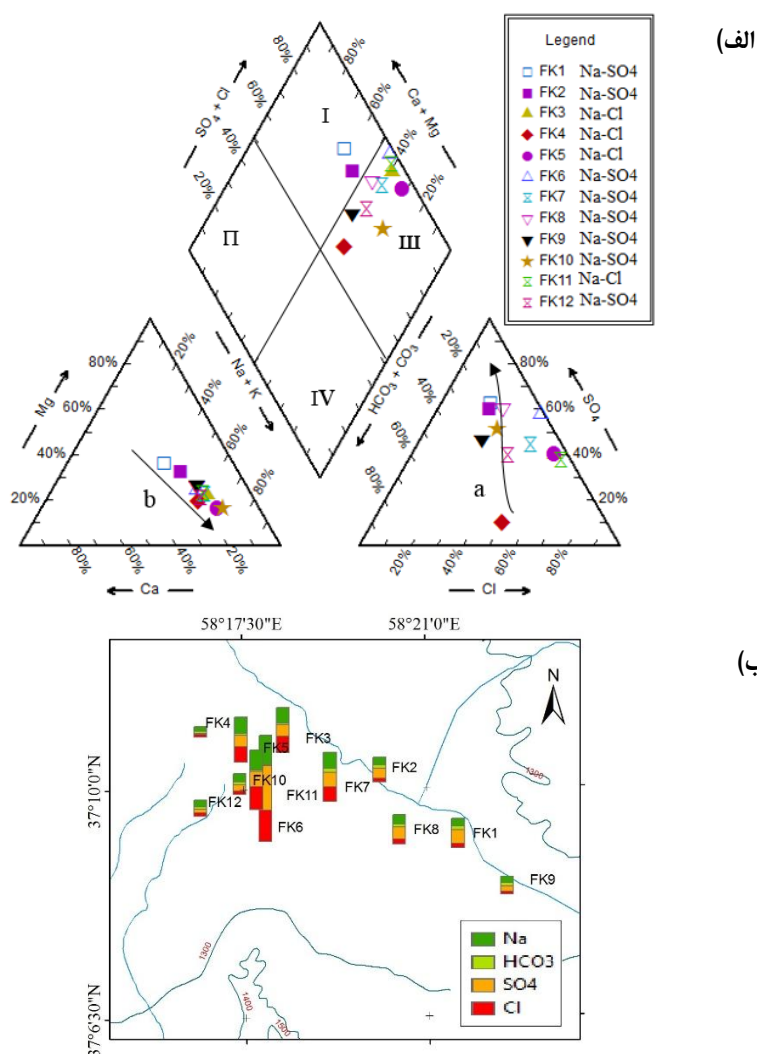
تیپ هیدروژئوشیمیایی نمونه های مورد مطالعه روی نمودار پایپر (شکل ۲الف) مشخص شده است. براساس این نمودار، تمامی نمونه های آب منطقه مورد مطالعه در رده آب های شور قرار می گیرد. با استفاده از نمودار پایپر می توان به واحدهای سنگی اثرگذار در ترکیب شیمیایی آب نیز پی برد. با توجه به روند خطی مختلف موجود در این نمودار می توان افزوده شدن یا خروج یون ها را از محیط آب تشخیص داد. برای مثال، در مثلث آنیون ها، اگر نمونه های آب در نزدیکی ضلع مربوط به غلظت آنیون سولفات و در امتداد خطی مستقیم قرار گیرد، می توان گفت که منابع آب تحت تأثیر افزوده شدن یا کاسته شدن سولفات و سدیم ناشی از فرایندهای هوازدگی و تبادل یونی در آبخوان های منطقه قرار گرفته است (هانسلو، ۱۹۹۵: ۵۲).

نمونه های آب مورد مطالعه از روند یادشده پیروی می کند و در مثلث آنیون ها که نشان دهنده افزوده شدن یون های سولفات و در مثلث کاتیون ها سدیم به محیط آب در اثر هوازدگی و تبادل یونی است (شکل ۲الف)، نشان دهنده تبادل یونی یا انحلال آلبیت (رابطه ۱) موجود در آندزیت های پلیو-کواترنر منطقه است که غلظت سدیم، بیکربنات و CO₂ را بالا می برد. در نتیجه، کاهش فشار جزئی کربنات کلسیم و افزایش pH را به دنبال دارد (سرکار و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۴۰). این فرایند، همچنین انحلال کربنات ها باعث افزایش آنیون بیکربنات شده است. همان طور که از روی نمودار مثلثی آنیون پایپر مشخص است، در برخی نمونه ها (FK9 و FK2, FK4) بیکربنات آنیون دوم در ترکیب شیمیایی آب هاست.

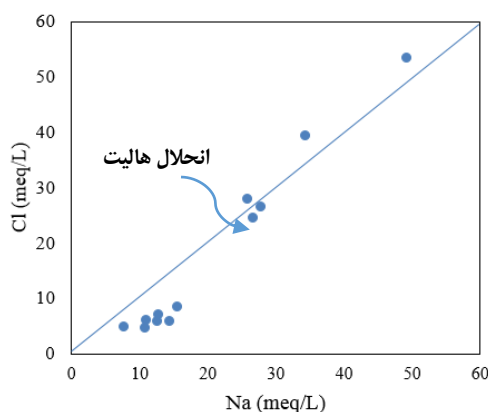


ترکیب شیمیایی آب را یون‌های اصلی آن (Ca^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , CO_3^{2-}) کنترل می‌کند، به طوری که براساس آن می‌توان تیپ هیدروژئوشیمیایی آب را با استفاده از نمودار پایپر تعیین کرد. سدیم کاتیون غالب و یون‌های سولفات و کلر آنیون‌های غالب در نمونه‌های آب مورد مطالعه است. اکثر نمونه‌ها (۶۶/۶۶ درصد) دارای تیپ $Na-SO_4$ است و ۳۳/۳۳ درصد از نمونه‌ها تیپ $Na-Cl$ دارد. از سمت شرق به سمت مرکز و غرب میزان سولفات و کلر افزایش می‌یابد (شکل ۲ ب).

منبع اصلی سدیم، علاوه بر حالت، شامل چشمه‌های آب گرم، شورابه‌ها و انحلال برخی سیلیکات‌های سدیک مانند پلاژیوکلاز آلبیت است. اگر مقدار سدیم و کلر برابر باشد، نشان‌دهنده منشأ کانی‌ها است. اگر $Na^+ < Cl^-$ ، نشان‌دهنده تبادل یونی معکوس، و اگر $Na^+ > Cl^-$ ، نشان‌دهنده منشأ دیگر سدیم به غیر از حالت، مثل آلبیت (پلاژیوکلازها) یا تبادل یونی طبیعی است (هانسلو، ۱۹۹۵: ۹۰-۹۲). نمودار دوتایی سدیم به کلر در شکل ۳ آورده شده است. در برخی نمونه‌ها نسبت سدیم به کلر نزدیک به ۱ و نشان‌دهنده انحلال اولیه از حالت (رسوبات نئوژن حاوی تبخیری‌ها) است. مقادیر سدیم تحت تأثیر فرایندهای انحلال آلبیت (پلاژیوکلازهای موجود در آندزیت‌های منطقه) و افزایش سدیم به آب و در موارد اندکی حذف سدیم از طریق تبادل یونی معکوس نیز است.



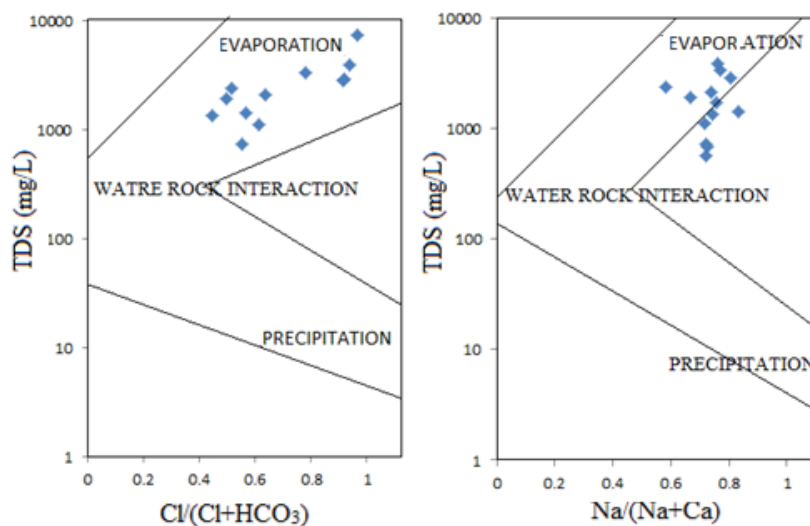
شکل ۲. الف) نمودار پایپر (پایپر، ۱۹۴۴:۹۲۴) مربوط به نمونه‌های آب برداشت شده از جنوب شرق فاروج، ب) میزان سولفات و کلر از ورودی آبخوان به سمت مرکز و خروجی آبخوان افزایش و کیفیت آب کاهش می‌یابد. I به سختی دائم، II به سختی موقت، III به شور یا saline و IV هم به آلكالی کربناته اشاره دارد. a به افزایش یون سولفات ناشی از کانی‌های تبخیری و b به افزایش سدیم از طریق انحلال پلاژیوکلازهای داسیت و آندزیت یا تبادل یونی اشاره دارد (هانسلو، ۱۹۹۵: ۹۰-۹۲).



شکل ۳. نمودار دوتایی سدیم به کلر. در برخی نمونه‌ها نسبت سدیم به کلر نزدیک به ۱ و نشان‌دهنده انحلال اولیه از هالیت است. علاوه بر این، مقادیر سدیم تحت تأثیر فرایندهای انحلال آلیت و افزایش سدیم به آب (داده‌های زیر خط تعادل) و در موارد اندکی نیز حذف سدیم از طریق تبادل یونی معکوس (بالای خط تعادل) است.

فرایندهای کنترل‌کننده شیمی آب‌ها و تعیین منشأ یون‌ها

به منظور ارزیابی ترکیب یون‌های اصلی موجود در آب‌های زیرزمینی و بررسی تأثیر سنگ‌های دربرگیرنده بر منابع آب منطقه و نیز تعیین فرایند کنترل‌کننده شیمی آب از دیاگرام گیبس (گیبس، ۱۹۷۰: ۱۰۸۸-۱۰۸۹) استفاده شد. گیبس در سال ۱۹۷۰ با بررسی مطالعات انجام‌گرفته روی برخی منابع آب جهان، سه سازوکار اصلی را مشخص کرد: ۱. واکنش‌هایی که در آن اثر بارندگی غالب است. ۲. واکنش‌هایی که تحت تأثیر برهم‌کنش آب و سنگ است. ۳. تبخیر و ته‌نشینی که تأثیر زیادی بر ترکیب شیمیایی آب دارد (سلواکومار و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۹). همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، فرایندهای اصلی کنترل کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی دشت فاروج پدیده‌های برهم‌کنش آب-سنگ و تبخیر است. این نتیجه‌گیری با توجه به وجود رسوبات آبرفتی کواترنر در آبخوان دشت فاروج منطقی به نظر می‌رسد که بخشی از آن حاصل فرسایش نهشته‌های نئوژن دربردارنده لایه‌های تبخیری است.

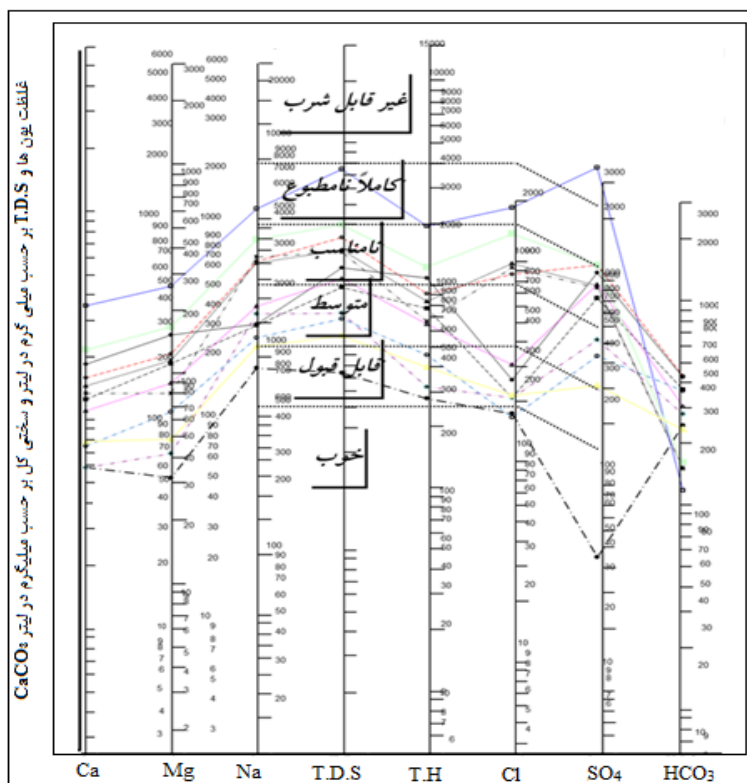


شکل ۴. نمودار گیبس (۱۹۷۰) مربوط به نمونه‌های آب برداشت‌شده از جنوب شرق فاروج

طبقه‌بندی آب زیرزمینی در مصارف شرب

معمولاً بررسی کیفیت آب زیرزمینی در مصارف شرب، با استفاده از دیاگرام شولر انجام می‌شود. در این طبقه‌بندی بر اساس غلظت املاح و یون‌های اصلی مورد نیاز بدن، آب زیرزمینی به شش رده قابل شرب خوب، قابل قبول، نامناسب، بد،

قابل استفاده در شرایط اضطراری و غیرقابل شرب تقسیم می‌شود (کرومن و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۶). در شکل ۵ طبقه‌بندی شولر برای کیفیت آب شرب نشان داده شده است. بر اساس نمودار شولر آب منطقه کیفیت نامناسبی برای شرب دارد. کاهش کیفیت نمونه‌ها ممکن است ناشی از برهم‌کنش آب-سنگ و پدیده‌هایی مانند تبادل یونی در آبخوان طی عبور از آبرفت‌های کواترنر در دشت باشد.



شکل ۵. نمودار شولر (۱۹۶۲) آب زیرزمینی دشت فاروج برای مصارف شرب

بررسی کیفیت آب زیرزمینی در مصارف صنعتی

در استفاده از آب در مصارف صنعتی، پارامترهای مختلفی مطرح است، ولی به‌طور عمومی دو پارامتر خوردگی و رسوبگذاری آب در تمامی صنایع اهمیت دارد. در ارزیابی پتانسیل خوردگی و رسوبگذاری آب‌ها در صنایع و شبکه‌های توزیع و انتقال آب، از ضرایب و شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود، از جمله شاخص لانژیه (LSI) (Langelier's Index) و شاخص رایزنر (Ryznar Index)؛ فن و همکاران، ۲۰۱۶: ۴). این دو شاخص از رابطه بین pH معمولی آب و pH اشباع از کربنات کلسیم آب (وابسته به میزان املاح و سختی مربوط به یون کلسیم و قلیایی بودن کل آب) از طریق روابط (۲) محاسبه می‌شود.

$$LSI = pH - pH_s \quad (۲ الف)$$

$$RI = 2 pH_s - pH \quad (۲ ب)$$

اگر شاخص لانژیه مثبت باشد ($LSI > 0$)، آب از کربنات کلسیم فوق‌اشباع است و تمایل به رسوبگذاری دارد. اگر منفی باشد ($LSI < 0$)، آب تحت اشباع است و تمایل به تجزیه کربنات کلسیم دارد و چنانچه برابر با صفر باشد، آب از کربنات کلسیم اشباع است و تمایلی به ایجاد یا تجزیه کربنات کلسیم ندارد (شمس و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۴۸۵). در شاخص رایزنر نیز اگر $RI < 6$ ، آب رسوبگذار است. اگر بین ۶ تا ۷ باشد، آب خنثی است و چنانچه $RI > 8$ ، آب خاصیت خوردگی دارد. لازم به ذکر است که مقادیر این شاخص‌ها لزوماً با یکدیگر مطابقت ندارد و هر کدام ماهیت متفاوتی دارد.

(سینگ و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۲۷). نمونه‌های مورد مطالعه از لحاظ شاخص لانتزلیه کاملاً نامناسب و تمامی نمونه‌های آب رسوبگذار است، ولی از نظر شاخص رایزنر ۴۱/۶۶ درصد از نمونه‌ها خنثی و ۵۸/۳۳ درصد نمونه‌ها رسوبگذار است (جدول ۲).

جدول ۲. طبقه‌بندی کیفیت آب برای مصارف صنعتی

کد نمونه	RI	کیفیت آب براساس RI	LSI	کیفیت آب براساس LSI
FK1	۵/۴	رسوبگذار	۱/۲	رسوبگذار
FK2	۶/۰۲	خنثی	۰/۷۸	رسوبگذار
FK3	۴/۹۹	رسوبگذار	۱/۴۱	رسوبگذار
FK4	۶/۷۸	خنثی	۰/۵۲	رسوبگذار
FK5	۵/۰۵	رسوبگذار	۱/۳۵	رسوبگذار
FK6	۳/۷۵	رسوبگذار	۲/۰۵	رسوبگذار
FK7	۴/۷۸	رسوبگذار	۱/۵۲	رسوبگذار
FK8	۵/۴۲	رسوبگذار	۱/۲۸	رسوبگذار
FK9	۶/۳۵	خنثی	۰/۶۵	رسوبگذار
FK10	۶/۰۲	خنثی	۰/۹۸	رسوبگذار
FK11	۴/۶	رسوبگذار	۱/۵	رسوبگذار
FK12	۶/۲۲	خنثی	۰/۷۸	رسوبگذار

شاخص پوکوریوس (PSI)

شاخص پوکوریوس پتانسیل خوردگی یا رسوبگذاری آب را ارزیابی می‌کند. این شاخص همچنین، به نام شاخص رسوبگذاری عملی معروف است و برخلاف سه شاخص دیگر با pH واقعی آب ارتباطی ندارد. در واقع، مقادیر این شاخص متأثر از ظرفیت بافری آب است که برای محاسبه این تأثیر از pH تعادلی به جای pH واقعی آب استفاده می‌شود (دویل و همکاران، ۲۰۰۹: ۲).

برای محاسبه اندیس پوکوریوس از رابطه (۳) استفاده می‌شود.

$$PSI = 2pH_s - pH_{eq} \quad (3)$$

pH_{eq} (pH تعادل) از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$pH_{eq} = 1.465 \log [Alk] + 4.54 \quad (4)$$

مقدار این اندیس طبق جدول ۳ تفسیر می‌شود. همان‌گونه که در جدول ۵ آمده است، بر اساس شاخص پوکوریوس کل نمونه‌ها رسوبگذار است.

جدول ۳. تفسیر مقدار اندیس پوکوریوس

تفسیر	مقدار اندیس
تمایل به رسوبگذاری	$PSI < 6$
تمایل به خوردگی	$PSI > 6$

اندیس تهاجمی (AI)

شاخص تهاجمی برای لوله‌های نوع آریست-سیمان و برای محدوده دمایی ۴ تا ۲۷ درجه سلسیوس به کار می‌رود. مقادیر این شاخص عمدتاً تابعی از pH، غلظت کلسیم و قلیایی بودن است (رضایی کلانتری، ۲۰۱۳: ۱۲۸).

برای تعیین اندیس تهاجمی از رابطه (۵) استفاده می‌شود.

$$AI = pH + \log[(Alkalinity)(Hardness)] \quad (5)$$

Alkalinity = قلیایی بودن کل (mg/l CaCO₃)

Hardness = سختی کلسیم (mg/l CaCO₃)

مقدار این اندیس مطابق جدول ۴ تفسیر می‌شود. همان گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، بر اساس اندیس تهاجمی تمامی نمونه‌ها رسوبگذار است. به دلیل وجود سازندهای کربناته (تیرگان) و نهشته‌های نتوزن (M^s) که به ترتیب حاوی کانی‌های کربناته و تبخیری حاوی ژپیس است، بیشتر آب‌ها رسوبگذار است.

جدول ۴. تفسیر مقدار اندیس تهاجمی

مقدار اندیس	تفسیر
AI < ۱۰	به شدت خورنده
۱۰ < AI < ۱۲	خورنده (متوسط)
AI > ۱۲	غیرخورنده (رسوبگذار)

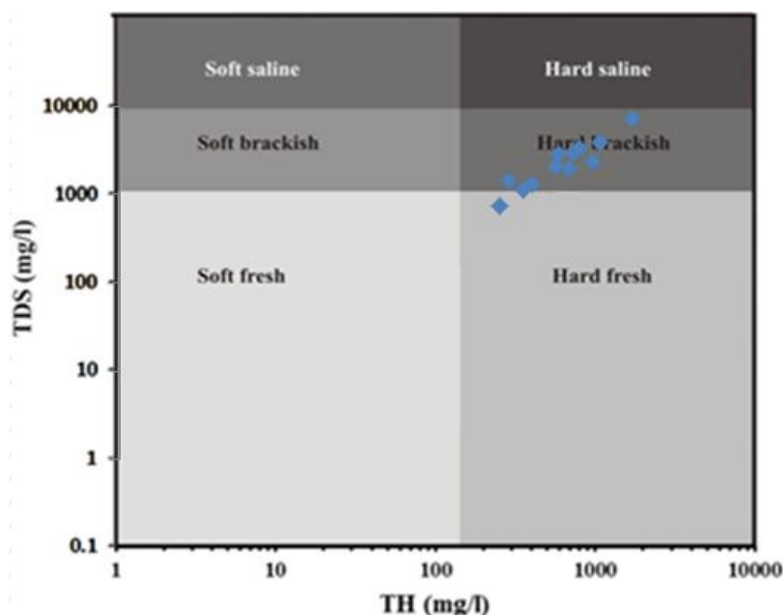
جدول ۵. مقادیر و رده بندی نمونه‌های آب بر اساس شاخص پوکوریوس و تهاجمی

کد نمونه	PSI	کیفیت بر اساس PSI	AI	کیفیت بر اساس AI
FK1	۵/۰۳	رسوبگذار	۱۳/۳۰	رسوبگذار
FK2	۵/۴۳	رسوبگذار	۱۲/۹۲	رسوبگذار
FK3	۴/۱۸	رسوبگذار	۱۳/۵۰	رسوبگذار
FK4	۶/۷۴	رسوبگذار	۱۲/۵۱	رسوبگذار
FK5	۴/۱۳	رسوبگذار	۱۳/۳۷	رسوبگذار
FK6	۲/۵۷	رسوبگذار	۱۴/۱۹	رسوبگذار
FK7	۳/۹۶	رسوبگذار	۱۳/۵۶	رسوبگذار
FK8	۵/۱۰	رسوبگذار	۱۳/۳۴	رسوبگذار
FK9	۵/۹۳	رسوبگذار	۱۲/۷۰	رسوبگذار
FK10	۵/۷۵	رسوبگذار	۱۳/۰۰	رسوبگذار
FK11	۳/۴۰	رسوبگذار	۱۳/۵۸	رسوبگذار
FK12	۵/۹۸	رسوبگذار	۱۲/۷۴	رسوبگذار

بر اساس مطالعه بریندها و همکاران (۹۴:۲۰۱۷) نمودار دوتایی مواد جامد محلول (TDS) نسبت به سختی کل (TH) ترسیم شد (شکل ۶). سختی ویژگی طبیعی آب و منعکس کننده کلسیم و منیزیم به صورت کربنات، بیکربنات و سولفات است. این پارامتر به طور معمول بسیار پایدار و تنها زمانی نیازمند آنالیز است که نگرانی در رابطه با فرایند رسوبگذاری در سیستم لوله کشی آب در ساختمان‌ها وجود داشته باشد (تامسون و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۳۳). همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، آب‌ها روندی از شیرین سخت (hard fresh) به سمت لب شور سخت (hard brackish) دارد که متأثر از فرایندهای کنترل کننده شیمی آب در منطقه است.

ضریب همبستگی پارامترهای شیمیایی

بررسی همبستگی میان متغیرهای مختلف باعث درک بهتری از تغییرات کیفیت آب و عوامل مؤثر بر آن می‌شود و در نهایت سبب مقایسه بهتر نمونه‌ها با یکدیگر می‌شود. به منظور تعیین میزان همبستگی و تشخیص روابط بین متغیرهای شیمیایی، ماتریس همبستگی ترسیم شد. همان طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان همبستگی بین متغیرهای Na با Cl، Mg با Ca و SO₄ با TDS با علامت مثبت (همبستگی مستقیم) و کمترین میزان همبستگی بین متغیرهای HCO₃ با EC، Na، Cl و K با علامت منفی (همبستگی معکوس) است. میان EC، TDS، Ca، K، Mg، Na، Cl همبستگی معنادار مثبتی در سطح ۰/۰۱ درصد وجود دارد.



شکل ۶. نمودار نسبت TDS به TH که نشان می‌دهد آب‌ها روندی از شیرین سخت (hard fresh) به سمت لب شور سخت (hard brackish) دارد

جدول ۶. ضرایب هم‌بستگی پیرسون بین پارامترهای اندازه‌گیری شده

	T	pH	EC	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄
T	۱										
pH	-.۰۴۵	۱									
EC	*.۰۶۰۶	.۰۰۲۶	۱								
TDS	-.۰۲۶۱	.۰۰۰۷	**-.۰۸۵۳	۱							
Ca	-.۰۰۷۵	-.۰۰۹۵	**-.۰۷۳۶	**-.۰۹۶۵	۱						
Mg	-.۰۰۵۹	-.۰۱۳۶	*.۰۶۵۹	**-.۰۹۳۳	*.۰۹۸۵	۱					
Na	.۰۴۵۰	-.۰۰۱۹	**-.۰۹۴۱	**-.۰۹۵۹	**-.۰۸۸۲	**-.۰۸۲۸	۱				
K	*.۰۵۸۰	-.۰۰۹۷	**-.۰۸۱۳	*.۰۶۷۸	*.۰۶۵۹	.۰۵۵۰	**-.۰۷۴۱	۱			
HCO ₃	*.۰۶۴۴	-.۰۰۳۷	*.۰۶۹۱	-.۰۴۴۹	.۰۳۵۷	-.۰۲۴۵	*.۰۵۹۰	**-.۰۸۱۱	۱		
Cl	-.۰۴۸۰	-.۰۰۸۵	**-.۰۹۵۲	**-.۰۹۳۲	**-.۰۸۶۹	**-.۰۸۰۹	**-.۰۹۸۷	**-.۰۸۰۹	*.۰۶۴۲	۱	
SO ₄	-.۰۱۳۷	.۰۰۹۷	**-.۰۷۴۱	**-.۰۹۷۰	**-.۰۹۴۸	**-.۰۹۳۷	**-.۰۸۷۲	*.۰۵۸۰	.۰۳۵۵	**-.۰۸۲۳	۱

هدایت الکتریکی (EC) آب نشان‌دهنده قدرت یونی محلول در انتقال جریان الکتریسیته و تابعی از قدرت یونی آب (آنیون‌ها HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) و کاتیون‌های $(\text{Ca}^{2+}$, Na^+ , Mg^{2+} , $\text{K}^+)$ موجود در آب است. به همین دلیل است که با افزایش آنیون‌ها و کاتیون‌ها در آب EC نیز افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، با افزایش EC، مقدار کل جامدات محلول (TDS) نیز افزایش نشان می‌دهد، در نتیجه بین آنیون‌ها، کاتیون‌ها، EC و TDS هم‌بستگی معنادار مثبت مشاهده می‌شود (جوئیون کناشلم و همکاران، ۲۰۱۰: ۶۵۱).

ارتباط معنادار مثبت بین SO_4 و Ca نشان می‌دهد که انحلال و هوازگی ژپس فرایند غالب در کنترل این دو پارامتر است. در تعیین سازوکار شوری در مناطق خشک و نیمه‌خشک و Na و Cl هم‌بستگی مثبت و معناداری دارد و نشان می‌دهد که سدیم و کلر ممکن است حاصل انحلال هالیت در آبخوان باشد (سمی، ۱۹۹۲: ۳۷؛ مگاریتز و همکاران،

۱۹۸۱: ۶۰۳). البته، در این صورت انحلال هالیت غلظت‌های مساوی از سدیم و کلر در محلول آزاد می‌کند و نتایج آنالیز هیدروشیمیایی نسبت ۱:۱ را نشان می‌دهد. در این مطالعه اکثر نمونه‌های برداشت‌شده از آبخوان کواترنری مقادیر بیشتر سدیم از کلر ($Na > Cl$) را نشان داد و دلالت بر این دارد که سدیم پس از آزادی اولیه از هالیت توسط منابع دیگر افزایش یافته است. از منابع احتمالی منشأ سدیم می‌توان به هوازگی فلدسپارهای سدیم‌دار از قبیل آلبیت در سنگ‌های ولکانیک پلیوکواترنر منطقه، همچنین تبادل یونی (هانسلو، ۱۹۹۵: ۵۲) اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه کیفیت منابع آب زیرزمینی منطقه جنوب شرق فاروج (خراسان شمالی) از لحاظ مصارف آشامیدن و صنعت بررسی شد. ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب بر اساس نمودار پایپر $Na-Cl$ و $Na-SO_4$ بود. نوع و رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی منابع آب منطقه مورد مطالعه با فراوانی کاتیون سدیم و آنیون سولفات و کلر مشخص شد. منشأ یون سدیم را می‌توان به انحلال کانی‌های تبخیری، همچنین آلبیت موجود در آندزیت‌های منطقه و پلاژیوکلازهای موجود در آن‌ها و تبادل یونی نسبت داد. یون‌های سولفات و کلر به انحلال کانی‌های موجود در نهشته‌های نئوژن، همچنین یون بیکربنات به انحلال سنگ‌های کربناته تیرگان مرتبط است. بر اساس نمودار شولر، آب منطقه کیفیت قابل قبول تا نامناسب برای شرب دارد. مهم‌ترین مخازن آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه نهشته‌های کواترنر است (تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌های قدیمی (Q^1) و تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌های جوان (Q^2)). این واحدها از نظر کیفیت آب موجود در آن‌ها به دو قسمت آبخوان‌های شور و شیرین تقسیم می‌شود. بیشترین واحدهای آب شیرین در رسوبات آبرفتی جوان تشکیل شده است، اما واحد Q^1 از شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه متأثر از نهشته‌های نئوژن (M^s) است که به‌واسطه وجود لایه‌های تبخیری و عناصر محلول در آب اثر منفی بر کیفیت منابع آبی محدوده مطالعاتی دارد و سبب افزایش درجه سختی آب شده است. نمونه‌های مورد مطالعه از لحاظ مصارف صنعتی کاملاً نامناسب و اکثر نمونه‌های آب رسوبگذار است. علت آن را می‌توان به وجود سازند کربناته (تیرگان)، سنگ‌های ولکانیکی (داسیت و آندزیت) و نهشته‌های نئوژن (M^s) حاوی کانی‌های تبخیری نسبت داد. در صورت استفاده از این منابع در مصارف صنعتی، باید تمهیدات لازم برای جلوگیری از رسوبگذاری آب به‌عمل آید.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد (ز. خسروانی شبیری) و طرح پژوهشی ۳/۴۲۸۹۸ است که از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد قدردانی می‌شود. همچنین، از خانم معصومه طاهری به خاطر همکاری‌های موثر علمی سپاسگزاریم.

منابع

- تاج‌بخشیان م.، محمودی‌قزائی، م.ح.، محبوبی، ا.، موسوی‌حرمی، ر. و جلالی، ا. (۱۳۹۴). بررسی هیدروژئوشیمیایی آب مناطق مجاور پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد با استفاده از نمودارهای ترکیبی، نمایه‌های اشباع و نسبت‌های یونی. ۲۵(۹۷): ۸۴-۷۱.
- نادری میقان، ن (۱۳۸۴). گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فاروج. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- Brindha, K.; Pavelic, P.; Sotoukee, T.; Douangsavanh, S. and Elango, L. (2017). Geochemical characteristics and groundwater quality in the vientiane plain, Laos. *Exposure and Health*. 9(2): 89-104.
- Choramin, M.; Safaei, A.; Khajavi, S.; Hamid, H. and Abozari, S. (2015). Analyzing and studding chemical water quality parameters and its changes on the base of Schuler, Wilcox and Piper diagrams (project: Bahamanshir River). *WALIA J*. 31(S4): 22-27.
- Davil, M.; Mahvi, A.; Norouzi, M. and Mazloomi, S. (2009). Survey of corrosion and scaling potential produced water from llam water treatment plant. *World Applied Science Journal*. 7(11): 1-6.
- Gibbs, R.J. (1970). Mechanism controlling world water chemistry. *Science*. 170: 1088-1090.
- Hounslow, A.W. (1995). *Water quality data: analysis and interpretation*. CRPress LLC, Florida.
- Jothivenkatachalam, K.; Nithya, A. and Mohan, S.C. (2010). Correlation analysis of drinking water quality in and around perur block of coimbatore district. *Tamil Nadu, India*. 3(4): 649-654.
- Magaritz, M.; Nadler, A.; Koyumdjisky, H. and Dan, N. (1981). The use of Na/Cl ratio to trace solute sources in a semiarid zone. *Water Resour Res*. 17: 602-608.
- Naderi Mighan, N. (2006). *Geological Map of Farouj, 1: 100000*. Geological Survey of Iran. No, 7664. [In Persian]
- Nematollahi, M.J.; Ebrahimi, P. and Ebrahimi, M. (2016). Evaluating hydrogeochemical processes regulating

- groundwater quality in an unconfined aquifer. *Environmental Processes*. 22: 1021-1043.
- Piper, A.M. (1944). A graphical procedure in the geochemical interpretation of water- analysis. *American Geophysical Union Transactions*. 25: 914-928.
- Rezaei Kalantari, R.; Reza, A.; Ahmadi, E.; Azari, A.; Tahmasbi Zade, M. and Gharagazlo, F. (2013). Survey of corrosion and scaling potential in drinking water resources of the villages in Qom province by use of four stability indexes (with quantitative and qualitative analysis). *Archives of Hygiene Sciences*. 2(4): 127-134.
- Sami, K. (1992). Recharge mechanisms and geochemical process in asemi-arid sedimentary basin, Eastern Cape, South African. *J Hydrol*. 139: 27-48.
- Sarkar, D.; Datta, R. and Hannigan, R. (2007). *Concepts and applications in environmental geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 5: 229-240.
- Schoeller, H. (1962). *Lexsouterraines*. Masson, Paris, 642 pp.
- Selvakumar, S. (2017). Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India. *Water Resources and Industry*. 17: 26-33.
- Shams, M.; Mohamadi, A. and Sajadi, S.A. (2012). Evaluation of corrosion and scaling potential of water in rural water supply distribution networks of Tabas, Iran. *World Appl. Sci. J*. 17(11): 1484-1489.
- Singh, K.P.; Malik, A. and Mohan, D. (2006). Evaluation of groundwater quality in northern Indo-Gangetic alluvium region. *Environmental Monitoring and Assessment*. 112(1): 211-230.
- Tajbakhshian, M.; Mahmudy Gharaie, M.H.; Mahboubi, A.; Moussavi Harami, R. and Ejlali, I. (2015). Hydrogeochemical study of water resources in Shahid Hashemi-Nejad gas refinery and surrounding area using compound diagrams, saturation indices and ionic ratios. *Ulume-Zamin (In Farsi)*. 7(25): 71-84. [in Persian]
- Thompson, T.; Fawell, J.; Kunikane, S.; Jackson, D.; Appleyard, S.; Callan, P.; Bartram, J. and Kingston, P. (2007). *Chemical safety of drinking water: Assessing priorities for risk management*. World Health Organization.
- Yousefi, Z., Kazemi, F. and Mohammadpour, R.A. (2016). Assessment of scale formation and corrosion of drinking water supplies in Ilam city (Iran). *Kerman University of Medical Sciences*. 3(2): 75-80.