

ارزیابی ژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی و پساب‌های معدنی در محدوده معدن کرومیت جغتای خراسان رضوی (مقاله پژوهشی)

۱- مسلم یزدانی^{*}، دانش آموخته دکتری، گروه علوم، دانشکده علوم، دانشگاه اشفورد، کالیفرنیا، آمریکا.
yazdani.moslem@yahoo.com

۲- فریبا فروغی، استادیار، گروه چینه شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- ساناز مجیدیان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

چکیده

کرومیت (FeCr_2O_4) عمده ترین، کانسنگ معدنی کروم می‌باشد و در سنگ‌های اولترابازیک و افیولیت‌ها تشکیل می‌شود که در این سنگ‌ها، کروم معمولاً با منیزیم، آهن، نیکل و کبالت همراه است. ناحیه معدن کرومیت جغتای در شمال غرب زون افیولیتی سبزوار، واقع شده و دارای اقلیم کوهپایه گرم و خشک است. این ناحیه معدنی، دارای چندین ترانسه اکتشافی-استخراجی است که با تکنیک معدن‌کاری روباز، استخراج می‌شود. آب‌های زیرزمینی این ناحیه به‌صورت چشمه‌های ناشی از گسل خوردگی و قنات‌های حفرشده در دشت‌های آبرفتی، جریان می‌یابند. بررسی هیدروژئوشیمی آب قنات‌ها و پساب معدنی این ناحیه، با کمک آنالیز نمونه‌های آب با روش طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS)، انجام شد. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب از قنات‌های منطقه جغتای و پساب‌های معدن کرومیت، نشان داد که واحدهای افیولیتی و پساب معدن کرومیت، هر دو دارای غلظت بالایی از کروم و منیزیم می‌باشند که کروم عمدتاً در شکل کروم (IV) و یون کرومات (CrO_4^{2-})، در آب وجود دارد. تعداد ۲۵ نمونه (۷ نمونه از پساب معدن و ۱۸ نمونه از قنات‌های آق تپه، درویش، قره قاچ) مورد آنالیز قرار گرفت که غلظت حداکثری کروم در پساب معدن 99.23 mg/l و غلظت حداکثری کروم در آب قنات‌ها 66.11 mg/l بدست آمد که هر دو از حد استاندارد جهانی، بالاتر هستند. غلظت نسبتاً بالای کروم در آب قنات، متأثر از عوامل طبیعی (عبور آب از بستر سنگ‌های افیولیتی آبخوان) و غلظت بالای کروم در پساب معدنی، ناشی از فعالیت معدن‌کاری است. ترسیم دیاگرام پاپیر برای نمونه‌های آب، بیانگر مقادیر بالای منیزیم است که معرف چشمه‌های بی‌کربنات کلسیک بوده و میزان EC بالای نمونه‌های آب، اثبات‌کننده انحلال بالای یون‌های حل شده از بستر سنگ‌های افیولیتی در آب است.

واژگان کلیدی: هیدروژئوشیمی، کرومیت، پساب معدنی، آب قنات، کمر بند سبزوار-جغتای، فلزات سنگین.

مقدمه

اهمیت منابع آب در مناطق معدنی خشک

آب در مناطق معدنی خشک، نهاده‌ای راهبردی و تعیین‌کننده برای تداوم عملیات استخراج، فراوری و کنترل پیامدهای زیست‌محیطی است، زیرا در چنین مناطقی محدودیت هیدرولوژیک مستقیماً بر بهره‌وری معدن اثر می‌گذارد. در بسیاری از این پهنه‌ها، آب برای خردایش، شست‌وشو، فلوتاسیون، تغلیظ و سایر مراحل فراوری ضروری است و نبود آن می‌تواند

زنجیره تولید را مختل کند. کمبود آب همچنین هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد، زیرا تأمین، انتقال، تصفیه و بازچرخانی آب در اقلیم‌های خشک مستلزم سرمایه‌گذاری بیشتر است. از منظر فنی، آب در کنترل گردوغبار، کاهش حرارت تجهیزات و ارتقای ایمنی محیط کار نقش اساسی دارد و در غیاب آن، ریسک‌های عملیاتی به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد [۲]. در بُعد زیست‌محیطی، مدیریت آب برای

جلوگیری از افت کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی و کاهش تنش بر اکوسیستم‌های شکننده مناطق خشک، اهمیت حیاتی دارد. از منظر برنامه‌ریزی معدنی، دسترسی پایدار به آب باید در طراحی پروژه، انتخاب فناوری و ارزیابی امکان‌سنجی لحاظ شود، زیرا بدون آن توسعه معدن‌کاری در مناطق کم‌آب پایدار نخواهد بود. استفاده از فناوری‌های کم‌آب‌بر و پیش‌فراوری خشک، یکی از پاسخ‌های راهبردی به این محدودیت ساختاری است و می‌تواند وابستگی به منابع آبی را کاهش دهد. بازچرخانی و بهینه‌سازی مصرف آب نیز از مؤلفه‌های کلیدی معدن‌کاری پایدار در اقلیم خشک محسوب می‌شوند و نقش مهمی در کاهش هدررفت دارند. به‌طورکلی، آب در مناطق معدنی خشک نه یک نهاده جانبی، بلکه یک عامل تعیین‌کننده برای کارایی، پایداری و پذیرش محیط‌زیستی پروژه‌های معدنی است. از این رو، هر راهبرد توسعه معدنی در این مناطق باید بر پایه مدیریت یکپارچه آب و سازگاری فناورانه با محدودیت‌های اقلیمی بنا شود.

هیدروژئوشیمی کروم در محیط‌های افیولیتی

ناحیه افیولیتی سبزوار یکی از کمربندهای مهم افیولیتی شمال شرق ایران است که شامل طیفی از سنگ‌های اولترامافیک (هاریزبوژیت، دونیت، لرزولیت و...) مافیک (گابرو، بازالت و ...) و فلسیک (پاژیوگرانیت) می‌باشد، وجود لنزهای کرومیتی به‌ویژه در سنگ‌های دونیتی و همچنین عناصر فرعی همراه این توده‌های کرومیتی (به‌ویژه نیکل) و معدن‌کاری روباز در ناحیه جغتای و انباشتن روباره‌ها و مواد باطله معدنی در مسیر آبراه‌های طبیعی، احتمال آغشتگی آب‌های زیرزمینی و سطحی را به‌ویژه از نظر فلزات سنگین نظیر کروم و نیکل فراهم کرده است، هدف این تحقیق بررسی این احتمال در حوضه‌های آبخیز ناحیه می‌باشد. مقدار فلزات سنگین مانند Ni و Cr در آب‌های زیرزمینی و سطحی ناحیه، رابطه‌ی معنی‌داری با تمرکز همین مقدار در سنگ‌های اولترامافیک و رسوبات حاصله دارد. تعیین ارتباط

تمرکز فلزات سنگین به‌ویژه Cr و Ni در سنگ‌های اولترامافیک و فعالیت‌های ناشی از معدن‌کاری کرومیت بر روی ژئوشیمی آب‌های سطحی و زیرزمینی، نقش سنگ‌های اولترامافیک افیولیتی و لنزهای کرومیتی معدنکاری شده، و انباشت روباره‌های ناشی از فعالیت معدنی و همچنین فرآیندهای اولیه کانه آرایی در ناحیه جغتای، در تمرکز عناصر سنگین نظیر Ni و Cr در آب‌های زیر زمینی در ناحیه را مورد مطالعه قرار می‌دهد [۳].

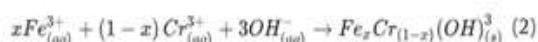
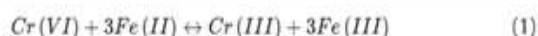
توده‌های آذرین این ناحیه در جهت تقریباً شرقی- غربی کشیده می‌شود و در وهله اول از سنگ‌های بسیار قلیایی تشکیل می‌گردد. توده‌های کرومیت به‌صورت نامنظم ولیکن با تمرکز معین در این سنگ‌ها پخش شده است. بخش اعظم منطقه مورد مطالعه متعلق به مجموعه افیولیتی و رسوبات همراه آن است، این ردیف متشکل از مجموعه‌هایی از انباشت‌های رسوبی، اولترامافیک و مافیک است که از کرتاسه زیرین آغاز شده و در کرتاسه پایانی- پالئوسن پایان می‌یابد. به‌طورکلی، همزمان و پس از کافت قاره‌ای است که منجر به باز شدن حوضه‌های با پوسته اقیانوسی، برای مدت کوتاهی شده و سپس در اثر حرکات همگرای تکتونیکی بسته شده است [۱۴، ۱۵].

منطقه جغتای دارای آب‌وهوای خشک و اقلیم بیابانی است و عمده آب موجود در آن از طریق شکاف گسل‌ها و قنات‌های حفر شده در رسوبات آبرفتی، تامین می‌شود [۸، ۲].

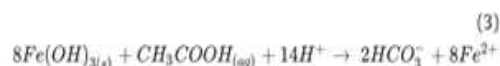
در دنیای امروز با توجه به مطرح شدن بحران کم آبی و صنعتی شدن جوامع در اثر پیشرفت تکنولوژی، مسئله حفاظت از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی در دامنه توجه قرار گرفته است. این منابع در اثر فعالیت‌های مختلف انسانی و ورود آلاینده‌های مختلف می‌توانند از دسترس مصرف‌کنندگان خارج شده و هزینه‌های اقتصادی غیر قابل توجیهی به جوامع وارد نمایند. از این‌رو همواره توجه به سلامت آب و تأمین آبی با کیفیت که از لحاظ بهداشتی و زیباشناختی مورد تأیید استانداردها باشد مورد نظر بوده است به

دباغی در منطقه می‌باشد [۱۳]. در این خصوص براساس مشاهدات جمع‌آوری شده در هنگام نمونه‌برداری از هر نقطه و عدم مشاهده منابع آلوده کننده، لذا نتایج تایید کننده این موضوع بود [۵، ۱۲].

چندین واکنش ژئوشیمیایی طبیعی می‌توانند متعاقباً Cr(VI) را به Cr(III) کاهش دهند و آن را بی‌حرکت کنند. کاهنده‌های مهم شامل مواد آلی، آهن دو ظرفیتی (Fe(II)) و کانی‌های سولفیدی هستند. [۱۷، ۲۱] به‌عنوان مثال، آهن احیا شده، Fe(II)، می‌تواند Cr(VI) را در محلول احیا کند (معادله ۱). کروم احیا شده و آهن اکسید شده تولید شده اغلب به‌صورت $Fe_xCr_{(3-x)}(OH)_3$ رسوب می‌کنند (معادله ۲):



برای مدل‌سازی pH کمتر از حد انتظار مشاهده شده، به مکانیسمی نیاز داریم که بتوان با افزایش pH ناشی از DIR مقابله کرد [۲۲، ۲۶، ۳۲]. از میان مکانیسم‌های احتمالی که در محیط‌های بی‌هوازی آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهند و pH را کاهش می‌دهند، متان‌زایی استوکلاستیک به‌عنوان محتمل‌ترین عامل مهم شناسایی می‌شود (معادله ۳):



در زمینه منشأ فلزات سنگین و کروم در آب‌های منطقه جغتای تاکنون تحقیق جامعی انجام نشده اما ریورا و همکاران (۲۰۱۹) پژوهش‌هایی را در RAMSAR شیلی و کامزتی و همکاران (۲۰۱۹)، پژوهش‌هایی را در آفریقای جنوبی در موارد مشابهی انجام داده‌اند؛ همچنین پژوهش‌های بسیاری در زمینه ارزیابی فلزات سنگین و نقش پساب صنایع و معادن کرومیت و مس و آهن و ید در ایران به‌ویژه تالاب گمیشان گرگان (فضلی، ۱۳۷۹)، تالاب شادگان خوزستان (چهارخواهی، ۱۳۸۳)، تالاب گاوخونی (دستجردی، ۱۳۸۴)، تالاب میانکاله (حسن زاده، ۱۳۸۸)، تالاب هامون (پایری، ۲۰۱۰)، تالاب انزلی (کریمی، ۱۳۹۰)، (خزائی، ۱۳۹۰)، (واصلی نسب،

گونه‌ای که کنترل کیفیت آب، آگاهی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و میکروبی آن از منبع تأمین کننده نیاز و ضروری می‌باشد [۴، ۵].

در بین آلاینده‌های آب، فلزات سنگین از مواردی می‌باشند که بسیار حائز اهمیت هستند. عناصری که در جدول تناوبی وزن مخصوص و عدد اتمی به‌ترتیب بیش‌تر از ۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۵۰ گرم داشته باشند در دسته فلزات سنگین طبقه‌بندی می‌گردند. فلزات مختلفی همانند سرب، کادمیوم، کروم، منگنز، روی ممکن است از طرق مختلف به‌شکل طبیعی یا مصنوعی به منابع تأمین کننده آب وارد شده و سبب ایجاد آلودگی گردند [۱۲]. صنایع دباغی، نساجی، آبکاری، باتری‌سازی، رنگ‌سازی، کاغذسازی، ذوب و استخراج فلزات و دیگر صنایع سبب انتشار این فلزات به محیط‌زیست خواهند شد [۸]. اگرچه حضور بعضی از این عناصر در حد جزئی در زنجیره غذایی انسان و موجودات زنده ضروری می‌باشد، اما در غلظت‌های بیش از حد مجاز عوارض سوء گوناگونی را ایجاد می‌نمایند. با توجه به خاصیت تجمعی فلزات سنگین در نسوج بدن، تجزیه‌ناپذیری، مقاومت به تجزیه بیولوژیکی و تمایل شدید کاتیون‌های این فلزات به گوگرد، لذا سبب اختلال فعالیت آنزیم‌های حیاتی در بدن موجودات زنده، سرطان و اثرات ژنتیکی کوتاه مدت و بلند مدت خواهند شد [۶]. فعالیت‌های مختلفی در راستای حذف این فلزات با روش‌های شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی و فرایندهای اکسید اسیون پیشرفته در منابع آبی و فاضلاب صورت گرفته است [۵، ۸].

حداکثر غلظت مجاز تعیین شده فلز کروم در منابع آشامیدنی توسط موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران استاندارد ۱۰۵۳ و سازمان بهداشت جهانی برابر ۵۰ میکروگرم بر لیتر است [۱۲].

مقایسه نتایج بدست آمده با استانداردها گویای عدم نگرانی در مورد منابع آبی از لحاظ آلودگی به عنصر کروم می‌باشد. به‌طورکل یکی از راه‌های ایجاد آلودگی آب توسط این فلز وجود صنایعی از قبیل آبکاری، شیشه‌سازی، صنعت نساجی، صنایع چاپ،

۱۳۹۰)، (بابایی، ۱۳۹۲)، (باقری، ۹۲)، (پناهنده، ۱۳۹۳)، (خداخواه، ۱۳۹۴)، (مهدی پور، ۱۳۹۴) و (اصغری، ۱۳۹۴)، تالاب گاوخونی (اصغری، ۱۳۹۴)، تالاب کجی خراسان جنوبی (صیادی، ۱۳۹۴)، تالاب‌های بین‌المللی آلاگل، آماگلوآجی گلدر استان گلستان (نفر، ۱۳۹۴) و تالاب گرگان (مروتی، ۱۳۹۷) انجام شده است.

مواد و روش‌ها

روش تحقیق از نوع توصیفی (Descriptive) و تجربی (Experimental) می‌باشد. نمونه‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی، مشاهده و ارتباط سنگ‌های افیولیتی ناحیه و آنالیز شیمیایی نمونه‌های اولترامافیک انجام شده توسط تحقیقات قبلی، آنالیز نمونه‌های آب با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) انجام گرفت. طیف‌سنجی جذب اتمی برای تعیین میزان کروم، منیزیم و فلزات سنگین، روش بسیار مناسبی است زیرا این روش برای اندازه‌گیری عناصر فلزی در غلظت‌های کم، حساس و دقیق است؛ زیرا شدت جذب با غلظت عنصر محلول، نسبت مستقیم دارد، برای کروم و منیزیم این روش در پایش آلودگی آب، کاربرد وسیعی دارد و برای مقادیر اندک هم کارآمد است [۳۱، ۳۲]. مقایسه نتایج بدست آمده از تست‌های انجام گرفته و نقشه‌های زمین‌شناسی و معدنی ناحیه، انجام شد. در این مطالعه، نمونه‌های آب منطقه از منظر هیدروژئوشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت تا میزان وجود عناصر فلزی، مخصوصاً کروم در آن اندازه‌گیری شود.

اهمیت پژوهشی منطقه جغتای

منطقه معدنی جغتای در اقلیم گرم و خشک واقع شده و اتکای این منطقه (شرب و کشاورزی) بر منابع آب زیرزمینی (قنات) است؛ این منطقه بیش از چند دهه، تحت عملیات معدن‌کاری کرومیت، قرار گرفته است و تاکنون تحقیق علمی و فنی قابل توجهی در این ناحیه در رابطه با میزان غلظت کروم و عناصر

سنگین فلزی در آب‌های زیرزمینی این ناحیه، انجام نگرفته است، بنابراین تحقیق حاضر می‌کوشد این خلاء پژوهشی را، پوشش دهد. هدف اصلی این پژوهش تعیین میزان غلظت کروم و منیزیم در پساب‌های معدنی و آب‌های زیرزمینی (قنات‌ها) در محدوده معدنی جغتای سبزوار است و پرسش اصلی این تحقیق آن است که غلظت فلزات سنگین در پساب معدنی و آب‌های زیرزمینی (قنات‌ها) در این منطقه در حد مجاز است یا از حد مجاز فراتر است و منشاء این غلظت‌های بالا تا چه میزان به ساختار زمین‌شناسی ناحیه جغتای و بستر آبخوان‌ها مربوط می‌شود و تا چه حدی به فعالیت معدن‌کاری، مرتبط است و در صورت آلاینده‌گی آب‌ها در این ناحیه، چه روش‌هایی جهت کنترل و تصفیه آلودگی، پیشنهاد می‌شود؟

همچنین برداشت نمونه‌ها با توجه به ساختار زمین‌شناسی منطقه، گسل‌ها، رسوب‌شناسی، نزدیکی به معدن، میزان برهمکنش آب-سنگ، فاصله آب‌های زیرزمینی از معدن و به نحوی انجام شده که همه بخش‌های معدن و پساب‌های آن و آب‌های زیرزمینی که به‌صورت قنات به سطح زمین جریان پیدا می‌کنند، پوشش داده شوند، بنابراین تعداد نمونه‌ها، نسبت مستقیمی با تعداد قنات‌ها، جهت جریان آب، میزان آب خروجی، دبی نسبی و میزان نزدیکی به معدن دارد، پساب‌های مختلف معدنی با توجه به فاصله از جبهه کارهای اصلی و فرعی انتخاب شود تا همه بخش‌های آبی منطقه از جمله کل قنات‌ها و کل پساب‌ها را پوشش دهد. بدین منظور در جدول ۱ و ۲، مشخصات کامل این نمونه‌ها و مختصات جغرافیایی برداشت نمونه‌ها و میزان غلظت کروم و منیزیم با جزئیات کامل، تنظیم شده و شرح داده شده است. در هر دو نمونه‌برداری با توجه به زمین‌شناس بودن نگارندگان، ساختار زمین‌شناسی منطقه، تغییرات و تنوع پترولوژیکی و سنگ‌شناسی و رسوب‌شناسی، مد نظر قرار گرفته است تا حداکثر تنوع زمین ساختی منطقه که بر روی کیفیت آب، تاثیر می‌گذارد، پوشش داده شود.

منطقه مورد مطالعه

ناحیه معدنی جغتای، در شمال غرب سبزوار در بین ۵۵' و ۶۰ درجه طول و ۳۵' و ۳۶ درجه عرض شمالی بین شاهرود و فریمان، توده بزرگی از سنگ‌های آذرین قرار گرفته است که محتوی تعداد زیادی توده‌های کرومیت به شکل رشته‌ها و عدسی‌های بزرگ و کوچک می‌باشد. [۱۷].

افیولیت سبزوار-جنوب فریمان در ناحیه شمال سبزوار و جنوب فریمان، رخنمون گسترده‌ای از سنگ‌های افیولیتی، سنگ‌های رسوبی-آتشفشانی و توالی از سنگ‌های دگرگونه (به‌ویژه سنگ‌های دگرگونی سلطان‌آباد) رخنمون دارد. همچنین در پاره‌ای نواحی، این سنگ‌های افیولیتی توسط سنگ‌های گرانیتوئیدی قطع شده‌اند. سنگ‌های افیولیتی عمدتاً شامل پریدوتیت، هارزبورژیت، گابرو و دایک‌های صفحه‌ای می‌باشد که توسط سنگ‌های رسوبی-آتشفشانی پوشیده می‌شوند. سنگ‌های رسوبی سن کرتاسه فوقانی-پالئوسن را تایید می‌کند. دگرگونه‌های سلطان‌آباد، در حد بین رخساره شیست‌های سبز و شیست آبی می‌باشند. این سری تدریجی با مجموعه Crossite - Barrosite نشان داده شده است. کمان ماگمایی شمال گسل درونه در بخش‌های مرکزی استان خراسان و در شمال گسل، نوار باریک اما گسترده‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی به سن ترشیر، با روند تقریباً شرقی-غربی و تحذب به سمت شمال، رخنمون دارد. بخش عمده‌ای از این واحدهای سنگی را توف، سنگ‌های پیروکلاستیکی، آندزیت، تراکیت، ایگنمبریت و ... تشکیل می‌دهد که توسط سنگ‌های گرانیتوئیدی به‌ویژه در منطقه شمال کاشمر، قطع شده‌اند. این وضعیت در سرتاسر شمال گسل درونه، بجز ناحیه پنجره فرسایشی تکنار (حد بین گسل درونه و گسل تکنار) قابل مشاهده است. در جنوب گسل تکنار، رخنمونی از سنگ‌های رسوبی پرکامبرین و پالئوزوئیک دیده می‌شود. به دلیل عملکرد محلول‌های

ماگمایی و هیدروترمالی، این ناحیه از نظر کانی‌شناسی فلزی و کانی‌های غیر فلزی حاصل از دگرسانی سنگ‌های منطقه، دارای اهمیت فوق‌العاده است [۳۱].

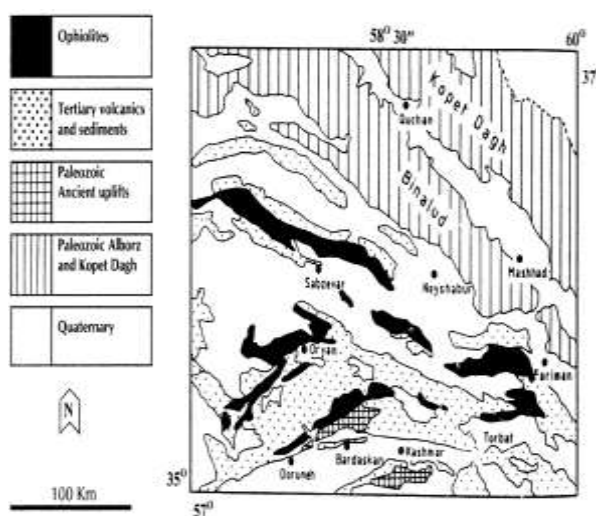
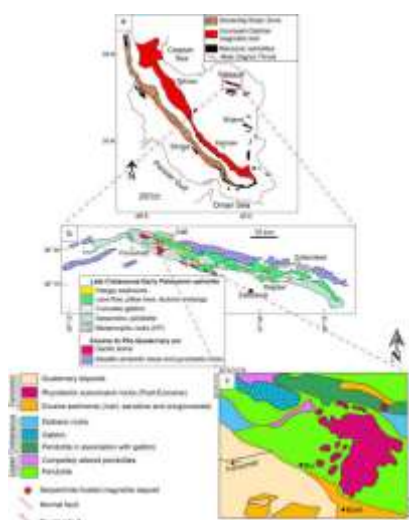
این منطقه از شاخص‌ترین مناطق افیولیتی ایران است که در کنار گسل درونه (کویر بزرگ) برون‌زد داشته و حدود ۲۰۰۰ کیلومتر مربع وسعت دارد. مجموعه تقریباً کاملی از سنگ‌های افیولیتی در این منطقه دیده می‌شود. هارزبورژیت‌ها، بخش عمده سنگ‌های اولترامافیکی منطقه را تشکیل می‌دهند. لیز سنگ‌های مافیک تا حدواسط و انواع اسیدی (کوارتز دیوریت و گرانوفیر) نیز در منطقه وجود دارد. میکروگابرها، از جمله سنگ‌های رگه‌ای فراوان منطقه‌اند و سری دایک‌های دیابازی که ساختمان صفحه‌ای دارند در بین گابرو و گدازه‌های زیردریایی با سخت بالشی یافت می‌شوند. سنگ‌های آتشفشانی زیردریایی، شامل لوکوبازالت، اسپلیت و کراتوفیر است، عمده‌ترین تهنشین‌های رسوبی، همراه با مجموعه افیولیتی، شامل آهک‌های پلاژیک به همراه کمی رادیولاریت است که سن اواخر کرتاسه (مایستریشتین) را معرفی می‌کنند. علاوه بر سنگ‌های رسوبی فوق، شیل‌های سبز و قرمز نیز وجود دارند. از نقطه نظر ژئوشیمیایی، افیولیت‌های منطقه سبزوار به استثنای سنگ‌های انباشتی (کومولاها) و میکروگابروها گرایش تولییتی دارند، بقیه گرایش کالکوالکالن نشان می‌دهند. افیولیت‌های منطقه، متحمل دگرگونی شده و بعضاً به آمفیبولیت و گارنت آمفیبولیت بدل شده‌اند. در مجموعه افیولیتی سبزوار افیولیت‌های دگرگون شده یا متافیولیت‌ها را شاهدیم که این دگرگونی‌ها در ارتباط با قسمت عمیق پوسته اقیانوسی و در نتیجه حرکت در حالت جامد به وجود آمده‌اند. علاوه بر دگرگونی‌های فوق، دگرگونی‌های فشار زیاد-حرارت متوسط، به صورت گلوکوفان-شیست و شیست‌های آبی در منطقه دیده می‌شود. با توجه به وسعت و حجم، می‌توان آن را به فشارهای

ناسازگاری‌هایی داشته باشد. اقلیم هر پهنه ناشی از برهم کنش پیوسته و پیچیده پدیده‌های هواشناسی مانند دما و بارش بر یکدیگر می‌باشد و نشان دهنده ویژگی‌های زیست بوم، هیدرولوژی آن پهنه است. در پهنه جغتای، اقلیم گرم و خشک حاکم است که توسط کوهپایه‌های کم ارتفاع کنترل می‌شود. همچنین منابع آبی منطقه در آبخوان‌های افیولیتی به صورت چشمه از مرز شکستگی‌های گسل خورده خارج می‌شود. در پهنه دشت‌ها نیز، آب ناشی از ارتفاعات افیولیتی به عمق سنگ‌ها هدایت شده که توسط قنات‌های حفر شده در رسوبات آبرفتی به صورت قنات به سطح زمین، منتقل می‌شود [۱۳]. حوضه آبریز سبزوار شامل شمال و جنوب ارتفاعات افیولیتی است، مطالعات رسوب‌شناسی نشان داده است که رسوبات آبرفتی منطقه، بیشتر از نوع sG، msG، gS، gmS است که به طور عمده به سمت پایین دست از گراول ماسه‌ای به ماسه گلی گراولی تغییر اندازه می‌دهد [۷].

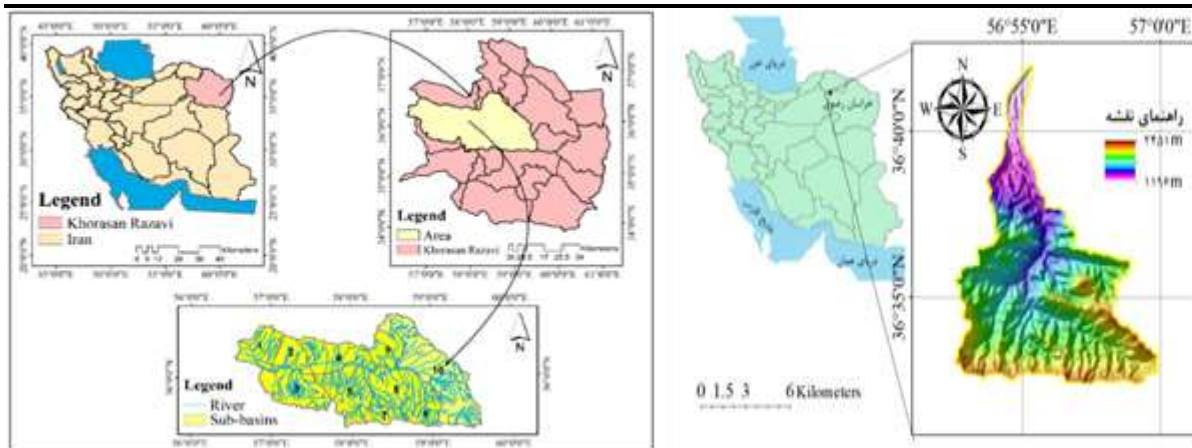
در شکل (۱) و (۲)، نقشه زمین‌شناسی منطقه جغتای به همراه موقعیت جغرافیایی و حوضه آبریز این ناحیه، نشان داده شده است.

ناشی از جابجایی و برخورد در فازهای کوهزایی مربوط دانست. در طی پالئوژن، قسمت شمالی منطقه مزبور، به وسیله گدازه‌ها توف‌های آتشفشانی پوشیده می‌شود و در قسمت جنوبی نیز بیشتر رسوبات قاره‌ای و تبخیری زمان نئوژن دیده می‌شود که حاصل آن رسوبات زیاد مارنی - ماسه‌ای همراه با گچ و نمک است. قسمت عمده رسوبات اخیر توسط رسوبات کنگلومرایی نوع بختیاری پوشیده می‌شوند. افیولیت‌های منطقه سبزوار از چند توده مجزا از هم تشکیل یافته است. در اکثر این توده‌ها سنگ‌های افیولیتی کرتاسه فوقانی با سنگ‌های آتشفشانی ائوسن تا میوسن متشکل از آندزیت، داسیت و کمی شوشونیت همراه‌اند. توده‌های مذکور، به وسیله گودال‌های وسیعی که خود از رسوبات کواترنر انباشته شده‌اند، از هم مجزا هستند. افیولیت‌های سبزوار در داخل یک منطقه پشت قوس و نزدیک به یک دراز گودال در حال فرورانش بوجود آمده‌اند [۳۱، ۱۳، ۱۴، ۱۶].

اقلیم، میانگین ویژگی‌های پایدار (جوی) یک پهنه جغرافیایی در بازه چند دهه است که می‌تواند با پدیده‌های روزانه هوا که در آن پهنه رخ می‌دهد



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی، نقشه زمین‌شناسی و موقعیت افیولیت‌های سبزوار



شکل ۲- حوضه آبریز سبزوار-جغتای و ارتفاعات منطقه مورد مطالعه

نتایج

نمونه‌برداری از منابع آب منطقه در شهریور ماه ۱۴۰۳ به منظور تعیین مقادیر کروم در منابع آب و اندازه‌گیری خواص فیزیکی و شیمیایی آب در ناحیه روستای گغت شهرستان جغتای انجام شد. پارامترهای فیزیکی شامل هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) در منطقه مورد بررسی، اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین خواص شیمیایی از هر منبع، یک ظرف پلی اتیلین 500 cc آب برداشت شد (در حین نمونه‌برداری سه بار با آب محل شستشو داده شد). پس از فیلترکردن نمونه‌ها به هر ظرف آب، 10cc اسید نیتریک ($\text{pH} \leq 2$)، جهت تثبیت فلزات سنگین اضافه گردید. سپس نمونه‌ها جهت تعیین غلظت فلزات سنگین (به‌ویژه کروم) با استفاده از روش (ASS) در آزمایشگاه تحقیقاتی شرکت نوین معدن آنالیز گردید.

در این مطالعه، جهت بررسی روند و توزیع آلودگی آب، تعداد ۲۵ نمونه (۷ نمونه از پساب معدن و ۱۸ نمونه از قنات‌های آق تپه، درویش، قره قاچ) مورد آنالیز قرار گرفت و نمونه‌ها برای تعیین غلظت عناصر سنگین به روش طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) به آزمایشگاه ژئوشیمی شرکت نوین معدن ارسال شدند. نتایج کیفی و کمی به‌دست آمده و توضیحات لازم در این قسمت ارائه می‌گردد. نتایج حاصل با تحقیقات قبلی مقایسه شده، و موضوعات مورد طبقه‌بندی قرار گرفته و برای ارائه نتایج از جدول، منحنی، نمودار و یا تصاویر استفاده می‌شود.

کروم (Cr) عنصری است که می‌تواند در ۶ ظرفیت مختلف 0, II, IV, V, VI وجود داشته باشد، که نشان دهنده تعداد پیوندها و اتم‌های پیوندی می‌باشد. کروم سه ظرفیتی (Cr III) و کروم ۶ ظرفیتی (Cr VI) رایج‌ترین گونه‌های کروم یافت شده در طبیعت می‌باشند. کروم سه ظرفیتی پایدارترین فرم کروم بوده و اغلب ترکیبات آن در آب نامحلول هستند. کروم ۶ ظرفیتی دومین فرم با ثبات و پایدار کروم و سمی‌ترین آنها است. بسیاری از ترکیبات آن در آب محلول هستند. بیشتر کروم ۶ ظرفیتی موجود در طبیعت توسط فعالیت‌های انسانی تولید می‌شود [۲۳، ۲۹، ۳۰].

کروم ۳ ظرفیتی در کرومیت‌های معدنی یافت می‌شود. خاک، رسوبات و آب و هوا همگی می‌توانند از طریق فعالیت‌های صنعتی به کروم آلوده شوند. گرد و غبار حاصل از عملیات‌های صنعتی از قبیل معدنکاری، گدازش و ذوب فلز، به هوای اطراف راه پیدا می‌کند، و خاک‌ها و آب‌های سطحی را آلوده می‌سازد. بیشتر کروم محلول در آب نهایتاً به درون رسوبات و آبرفت‌ها وارد می‌شوند. همچنین آلودگی خاک و آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌تواند از طریق رهاکردن فاضلاب‌های صنعتی و رهاکردن ترکیبات محلول کروم ۶ ظرفیتی از ضایعاتی همچون پسماندهای معدنی، سنگ‌های پسماند، گردوغبار و تفاله‌های صنعتی صورت گیرد [۲۴، ۲۵، ۲۸].

در مجموع تعداد ۲۵ نمونه از مناطق مختلف دشت جغتای در مقاطع مکانی و زمانی مختلف تهیه و

میزان غلظت کروم و منیزیم در هر کدام از آنها به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت کروم در نمونه های تحقیق در شکل ۳ خلاصه می شوند. همچنین غلظت کروم و منیزیم، در آب های قنات های آق تپه، درویش، قره قاچ و پساب معدن جغتای، در جدول ۱، اشاره شده است. pHها اغلب قلیایی و حد واسط هستند. EC نمونه های آب نیز دارای مقادیر بالایی می باشد (در پساب معدنی تا ۴۵۰۰ و آب قنات تا ۱۰۵۰) که بیانگر افزایش چشمگیر یون های محلول و تماس و برهم کنش و انحلال بالای یون های سنگ های افیولیتی در داخل آب است که هم جنس غنی از فلزات سنگین سنگ دربرگیرنده آبخوان و هم پساب معدنی را کاملاً توجیه می کند، زیرا اعداد بالای ۱۰۰۰، نشان دهنده افزایش یون های محلول و ورود یون های مختلف به داخل آب است.

به صورت نسبی، هر چقدر نقاط نمونه برداری شده به معدن نزدیک تر می شوند، غلظت کروم و منیزیم آن ها افزایش می یابد اما استثنائاتی نیز وجود دارد که برخی نقاط نمونه برداری آب قنات دارای کروم نسبتاً بالایی است و دلیل این موضوع نه معدن کاری بلکه ساختار به شدت تکتونیزه و خرد شده منطقه است که گسل ها باعث تغییر موقعیت لایه های سنگ های افیولیتی و آلتراسیون ها و متاسومتاسیس های گوناگون در سنگ ها شده که می تواند به صورت کاملاً طبیعی، غلظت کروم و منیزیم را بدون دخالت انسانی افزایش دهد اما به صورت کلی می توان این نتیجه را گرفت که پساب های معدنی دارای غلظت بالاتری از کروم و منیزیم نسبت به آب قنات ها هستند اما در عین حال چون منبع تغذیه قنات ها هم دقیقاً همان ارتفاعات افیولیتی است پس غلظت کروم و منیزیم به شکل طبیعی نیز بالاست.

بر اساس پراکنش نمونه ها در نمودار پایپر، تیپ هیدروشیمیایی غالب آب های مورد مطالعه از نوع بی کربنات کلسیک است که بیانگر چیرگی یون های کلسیم و بی کربنات در ترکیب شیمیایی آب می باشد. این الگو معمولاً نشان دهنده آن است که منشأ اصلی

یون های محلول، فرآیندهای انحلالی مرتبط با سنگ های کربناته، به ویژه افیولیت و در مواردی دولومیت، در محدوده تغذیه و مسیر جریان آب زیرزمینی است. غلبه کلسیم در بخش کاتیونی، از یک سو می تواند به انحلال کربنات کلسیم و از سوی دیگر به واکنش های آب-سنگ در محیط های کربناته نسبت داده شود. این موضوع نشان می دهد که آب در مسیر حرکت خود، تماس مؤثری با واحدهای زمین شناسی کربناته داشته و ترکیب آن عمدتاً تحت کنترل فرایندهای ژئوشیمیایی طبیعی شکل گرفته است. حضور منیزیم در مقادیر بالا در برخی نمونه ها، نشانه ای از مشارکت سنگ های دولومیتی، مارنی یا واحدهای کربناته منیزیم دار در تغذیه آبخوان است. افزایش منیزیم همچنین می تواند به معنای تشدید انحلال کانی ها در بخش هایی از مسیر جریان یا افزایش زمان تماس آب با محیط سنگی باشد. از دیدگاه هیدروژئوشیمیایی، ترکیب بی کربنات کلسیک همراه با Mg بالا معمولاً بیانگر یک سامانه نسبتاً تکامل یافته، اما هنوز تحت سلطه فرآیندهای انحلالی است. چنین الگویی اغلب در آب های تازه تا نسبتاً سخت مشاهده می شود و نشان دهنده سختی موقت قابل توجه در آب است. در این حالت، سهم فرآیندهای تبادل یونی، اختلاط با آب های شور یا تأثیرات تبخیری معمولاً در مقایسه با انحلال کربنات ها ثانویه است. بنابراین، نمودار پایپر حاضر به خوبی نشان می دهد که شیمی آب چشمه ها بیش از هر چیز از لیتولوژی کربناته حوضه تغذیه تأثیر پذیرفته است. این نتیجه با مدل هیدروژئوشیمیایی آبخوان هایی سازگار است که در آن ها گردش آب عمدتاً در میان سنگ های آهکی و دولومیتی انجام می شود. از سوی دیگر، منیزیم بالاتر می تواند نشان دهنده مشارکت نسبی دولومیت زدایی یا وجود لایه های منیزیم دار در مسیر جریان باشد. در مجموع، نمودار پایپر حاضر نشان می دهد که چشمه ها دارای منشأ کربناته بوده و رفتار هیدروشیمیایی آنها تحت سلطه انحلال کربنات ها و سهم نسبی واحدهای دولومیتی است. بنابراین، تیپ بی کربنات کلسیک

ممکن است به آزادسازی یا تثبیت کروم در محیط منجر شوند. این نمودار اساساً یک ابزار پیش‌بینی برای رفتار ژئوشیمیایی کروم در محیط‌های آبی است [۳۷].

مطابقت، دیاگرام pH-Eh در سیستم Cr-O-OH با داده‌های تحقیق حاضر، بیان می‌کند که کروم در شرایط شیمیایی منطقه جغتی نظر ترمودینامیکی، پایدارنسبی داشته و در این محیط، تمایل به محلول‌ماندن، اکسید شدن دارد و تمایل کمتری به رسوب کردن از خود نشان می‌دهد.

پیشنهاد می‌شود از روش اسمز معکوس یا RO برای تصفیه آب قنات‌ها و پساب‌های معدنی منطقه جغتی، استفاده شود. روش اسمز معکوس یا RO فرایند غشایی فشارمحور برای جداسازی آب از املاح محلول، یون‌ها، ذرات کلوئیدی و بسیاری از آلاینده‌های ریز است که بر خلاف اسمز طبیعی عمل می‌کند. اسمز معکوس یا RO یک فرایند غشایی فشارمحور برای جداسازی آب از املاح محلول، یون‌ها، مواد آلی محلول، ذرات کلوئیدی و بخشی از میکروارگانیسم‌هاست که در آن، آب با اعمال فشاری بالاتر از فشار اسمزی از یک غشای نیمه‌تراوا عبور داده می‌شود. اصل RO بر تفاوت پتانسیل شیمیایی دو محلول با غلظت‌های متفاوت استوار است. در اسمز طبیعی، حلال از سمت رقیق‌تر به سمت غلیظ‌تر حرکت می‌کند تا تعادل برقرار شود، اما در اسمز معکوس با اعمال فشار خارجی کافی، این جهت جریان معکوس می‌شود و آب از سمت شورتر به سمت رقیق‌تر رانده می‌شود. بنابراین RO در آب‌های لب‌شور و دریا، و نیز در آب‌های صنعتی-معدنی آلوده به یون‌های فلزی سنگین نظیر کروم، کارایی ویژه‌ای پیدا می‌کند [۳۳، ۳۴].

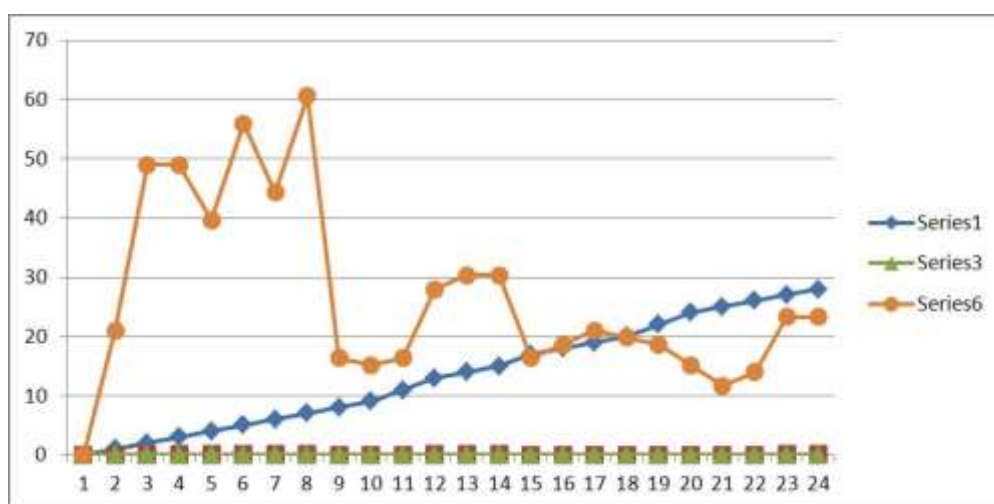
یک واحد صنعتی RO معمولاً از بخش پیش‌تصفیه، پمپ فشارقوی، هوزینگ‌های ممبران، ابزار دقیق، و واحد پس‌تصفیه تشکیل می‌شود. پیش‌تصفیه شامل فیلترهای فیزیکی، تنظیم pH، حذف اکسیدکننده‌های مخرب غشا و گاهی دوزینگ مواد ضد رسوب است تا از فولینگ و اسکالینگ

همراه با منیزیم بالا را باید شاخصی از تغذیه در محیط کربناته، زمان ماند متوسط، و کنترل ژئوشیمیایی غالب بر شیمی آب دانست. این الگو در تفسیر منشاء، مسیر حرکت و تکامل شیمیایی آب چشمه‌ها نقش بنیادین دارد و می‌تواند مبنای تحلیل‌های تکمیلی هیدروژئوشیمیایی در بخش‌های بعدی مقاله قرار گیرد. دولومیت‌های گورخری از سنگ‌های شاخص در مجموعه‌های افیولیتی است که در منطقه جغتی، به وفور دیده می‌شود.

دیاگرام pH-Eh در سیستم Cr-O-OH میدان‌های پایداری ترمودینامیکی گونه‌های مختلف کروم را در شرایط اکسایش-کاهش و اسیدی-بازی نشان می‌دهد (شکل ۴). این نمودار مشخص می‌کند که در چه محدوده‌ای از pH و Eh، کروم به‌صورت گونه‌های محلول، هیدروکسیدی، اکسیدی یا رسوبی پایدار است. در این سیستم، کروم می‌تواند میان حالت‌های اکسایش مختلف جابه‌جا شود و همین موضوع برای تفسیر رفتار آن در آب‌های طبیعی و آلوده بسیار مهم است. معمولاً نواحی با Eh بالاتر، شرایط اکسیدکننده‌تر را نشان می‌دهند و می‌توانند پایداری گونه‌های اکسیدشده‌تر کروم را تقویت کنند، درحالی‌که Eh پایین‌تر شرایط کاهنده‌تر را بازتاب می‌دهد. از سوی دیگر، pH، کنترل می‌کند که گونه‌های کروم به‌صورت محلول باقی بمانند یا به‌صورت فازهای جامد مانند هیدروکسیدها و اکسیدها ته‌نشین شوند. این دیاگرام برای پیش‌بینی این نکته به‌کار می‌رود که کروم در یک آب زیرزمینی یا آب سطحی، در چه شرایطی متحرک، کم‌تحرك یا رسوب‌پذیر است. به بیان دیگر، اگر آب در ناحیه‌ای از نمودار قرار گیرد که گونه‌های محلول کروم پایدار باشند، احتمال تحرک و انتقال آن در محیط بیشتر است؛ اما اگر شرایط به سمت نواحی پایداری فازهای جامد برود، کروم تمایل به تثبیت یا رسوب دارد. در هیدروژئوشیمی، این دیاگرام برای ارزیابی ریسک آلودگی کروم، طراحی روش‌های تصفیه و تفسیر منشأ و سرنوشت آن در آب کاربرد دارد. همچنین می‌تواند نشان دهد که تغییرات pH و Eh چگونه

اقتصادی‌تری حاصل شود. به همین دلیل، RO را باید یک «پلتفرم جداسازی» دانست نه فقط یک فیلتر ساده. از منظر مهندسی شیمی و آب، RO یک فرایند غشایی مبتنی بر فشار است که با انتخاب‌پذیری بالا، آب را از بخش عمده املاح و ناخالصی‌ها جدا می‌کند. در مقیاس صنعتی، موفقیت آن وابسته به طراحی درست پیش‌تصفیه، انتخاب ممبران مناسب، کنترل فشار و مدیریت رسوب‌گذاری است [۳۳، ۳۴]. همچنین با توجه به شدت بالای تابش نور خورشید در منطقه جغتای، انرژی مورد نیاز برای تصفیه آب را می‌توان به سهولت از انرژی خورشیدی، تامین نمود که در این منطقه دارای راندمان بالایی است و با هزینه پایین می‌توان آب قنات‌ها و پساب را تصفیه و سالم سازی کرد [۳۵، ۳۶].

جلوگیری شود. جداسازی در RO صرفاً براساس اندازه نیست، بلکه اندازه، بار الکتریکی، قطبیت، هیدراتاسیون یون‌ها و برهم‌کنش با ماتریس پلیمری غشا هم اثرگذارند. به همین دلیل، RO در حذف نمک‌های محلول، نیترات، بسیاری از فلزات و یون‌های چندظرفیتی بسیار مؤثر است. مزیت اصلی RO توان بالای آن در تولید آب با املاح پایین و کیفیت پایدار است. این روش نسبت به فرآیندهای حرارتی معمولاً انرژی کمتری در شیرین‌سازی آب لب‌شور مصرف می‌کند و برای بسیاری از صنایع یک راه‌حل استاندارد است. در بسیاری از سامانه‌های مدرن، RO به‌تنهایی به‌کار نمی‌رود، بلکه در کنار فیلتر شنی، کربنی، اولترافیلتراسیون، تزریق ضد رسوب و ضدعفونی تکمیلی قرار می‌گیرد تا عملکرد پایدارتر و



شکل ۳- نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری غلظت کروم در نمونه‌های تحقیق: خط آبی (ظرفیت یا -C خط سبز (میزان جذب)- خط قهوه‌ای (میزان کروم بر حسب ppb)

جدول ۱- غلظت کروم و منیزیم در نمونه‌های جمع‌آوری شده از آب‌های قنات‌های آق تپه، درویش، قره قاچ و پساب معدن کرومیت (نمونه‌های پساب معدنی Sg و نمونه‌های آب قنات Sd). EC، براساس میکروزمیمنس بر سانتی‌متر.

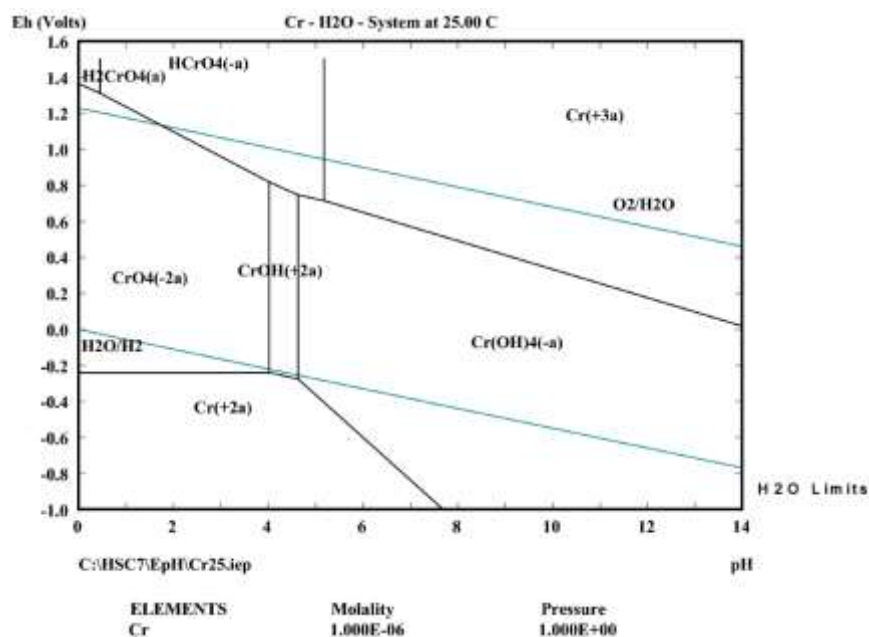
ردیف	علامت نمونه	غلظت کروم (Cr) بر غلظت منیزیم (Mg)		PH	EC(μS/cm)
		حسب میلی گرم در	بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم		
۱	Sg1	۹۸,۲۳	۲۹,۲۴	۸,۶	۲۲۰۱
۲	Sg2	۹۵,۳۸	۹۲,۶۳	۵,۷	۲۸۰۱
۳	Sg3	۹۵,۲۸	۹۸,۹	۸,۶	۲۹۰۰
۴	Sd1	۶۳,۴۹	۲۷,۴۷	۸,۶	۹۲۲
۵	Sg4	۹۴,۵۵	۷۳,۷۹	۸,۶	۳۵۰۰

۹۸۰	۷	۶۹,۳۸	۲۹,۳۴	Sd2	۶
۹۹۲	۵,۶	۴۳,۷۹	۶۱,۴۰	Sd3	۷
۱۰۰۱	۸,۶	۶۳,۴۲	۳۲,۲۶	Sd4	۸
۱۰۲۲	۵,۷	۵۸,۵۳	۱۵,۱۵	Sd5	۹
۱۰۱۱	۸,۶	۹۶,۵۱	۳۲,۳۶	Sd6	۱۰
۴۵۰۰	۵,۶	۷۴,۲۹	۹۷,۴۷	Sg5	۱۱
۹۹۲	۵,۶	۸۷,۲۳	۳۰,۴۰	Sd7	۱۲
۹۳۲	۵,۶	۷۷,۶۲	۳۰,۳۰	Sd8	۱۳
۹۴۰	۵,۶	۶۰,۴۲	۳۲,۲۶	Sd9	۱۴
۹۹۱	۶	۰۰,۵۰	۶۵,۱۸	Sd10	۱۵
۳۳۰۰	۶	۱۵,۴۳	۹۸,۲۰	Sg6	۱۶
۱۰۰۰	۶	۲۱,۷۷	۸۱,۲۹	Sd11	۱۷
۱۰۰۱	۵,۶	۹۸,۵۸	۶۵,۳۸	Sd12	۱۸
۱۰۰۲	۶	۹۳,۵۳	۱۵,۳۵	Sd13	۱۹
۹۹۲	۶	۷۹,۳۳	۶۶,۱۱	Sd14	۲۰
۴۴۰۰	۵,۶	۸۳,۶۸	۹۹,۲۳	Sg7	۲۱
۹۰۰	۷	۰۲,۳۹	۳۱,۲۳	Sd15	۲۲
۹۳۲	۵,۷	۲۷,۶۴	۲۳,۳۳	Sd16	۲۳
۹۹۵	۸,۶	۹۲,۶۱	۶۱,۶۰	Sd17	۲۴
۱۰۵۰	۷	۹,۹۹	۱۱,۶۴	Sd18	۲۵

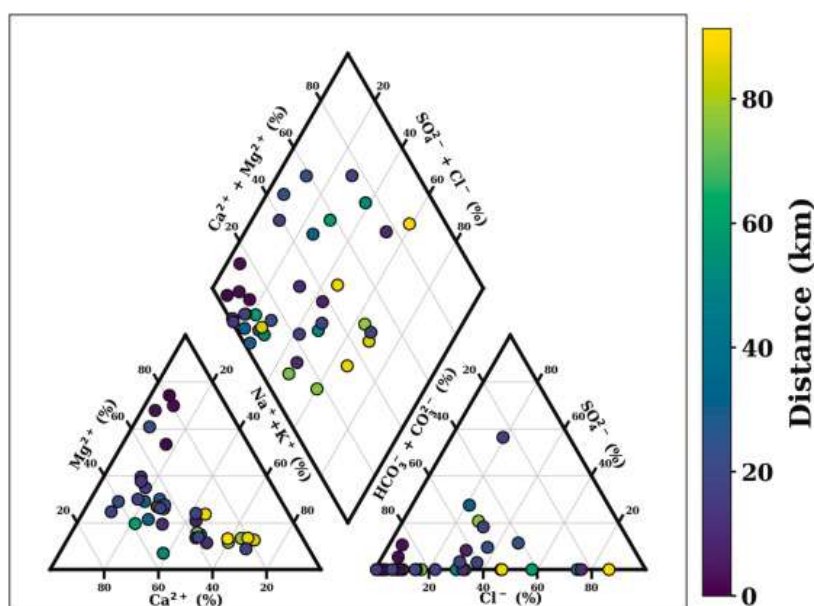
جدول ۲- بررسی مختصات جغرافیایی، فاصله نمونه‌برداری از معدن و نوع منبع آبی

ردیف	علامت نمونه	مختصات جغرافیایی	فاصله از معدن	نوع منبع آب
۱	Sg1	۳۶.۶۱۲۴۴۰, ۵۷.۰۱۰۲۵۱	داخل معدن	پساب معدنی
۲	Sg2	۳۶.۶۱۰۸۹۰, ۵۷.۰۱۱۸۸۱	داخل معدن	پساب معدنی
۳	Sg3	۳۶.۶۰۹۸۲۲, ۵۷.۰۰۸۹۶۳	داخل معدن	پساب معدنی
۴	Sd1	۳۶.۶۱۷۰۳۲, ۵۷.۰۱۵۰۰۹	۱ کیلومتر	قنات قره قاچ
۵	Sg4	۳۶.۶۰۸۸۲۳, ۵۷.۰۰۴۱۵۷	داخل معدن	پساب معدنی
۶	Sd2	۳۶.۶۱۷۸۹۷, ۵۷.۰۱۵۲۴۰	۱ کیلومتر	قنات قره قاچ
۷	Sd3	۳۶.۶۱۸۸۷۱, ۵۷.۰۱۵۵۹۴	۱ کیلومتر	قنات قره قاچ
۸	Sd4	۳۶.۶۱۹۴۶۲, ۵۷.۰۱۵۵۸۴	۱ کیلومتر	قنات قره قاچ
۹	Sd5	۳۶.۶۲۱۱۲۷, ۵۷.۰۱۵۵۸۴	۱ کیلومتر	قنات قره قاچ

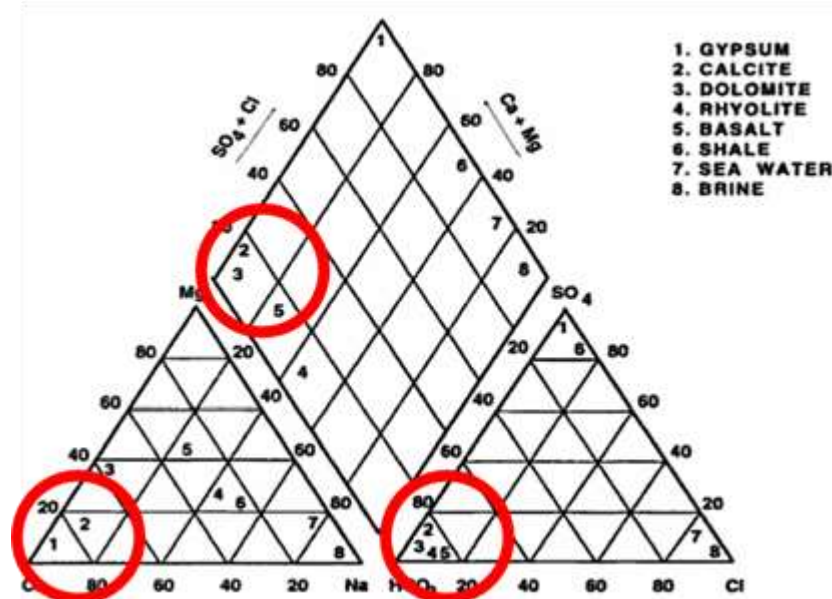
		۵۷.۰۱۴۹۱۵		
قنات درویش	۴ کیلومتر	, ۳۶.۶۱۶۷۵۲ ۵۷.۰۵۴۶۹۴	Sd6	۱۰
پساب معدنی	داخل معدن	, ۳۶.۶۰۷۸۹۳ ۵۷.۰۰۱۰۶۷	Sg5	۱۱
قنات درویش	۴ کیلومتر	, ۳۶.۶۱۸۳۱۶ ۵۷.۰۵۸۰۶۴	Sd7	۱۲
قنات درویش	۴ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۰۲۲۶ ۵۷.۰۶۰۱۲۲	Sd8	۱۳
قنات درویش	۴ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۱۴۱۳ ۵۷.۰۵۸۵۱۴	Sd9	۱۴
قنات درویش	۴ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۴۸۷۰ ۵۷.۰۵۹۹۲۹	Sd10	۱۵
پساب معدنی	داخل معدن	, ۳۶.۶۱۲۹۲۲ ۵۶.۹۸۸۲۷۸	Sg6	۱۶
قنات درویش	۴ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۳۳۲۲ ۵۷.۰۶۴۴۳۰	Sd11	۱۷
قنات درویش	۴ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۴۹۷۴ ۵۷.۰۶۰۳۱۴	Sd12	۱۸
قنات درویش	۴ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۴۸۷۰ ۵۷.۰۶۷۷۰۹	Sd13	۱۹
قنات آق تپه	۲ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۷۶۵۷ ۵۷.۰۷۳۸۸۲	Sd14	۲۰
پساب معدنی	داخل معدن	, ۳۶.۶۱۰۸۲۱ ۵۶.۹۸۲۲۷۰	Sg7	۲۱
قنات آق تپه	۲ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۵۲۰۲ ۵۷.۰۳۱۳۷۴	Sd15	۲۲
قنات آق تپه	۲ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۵۳۱۲ ۵۷.۰۲۹۸۷۳	Sd16	۲۳
قنات آق تپه	۲ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۴۵۶۳ ۵۷.۰۲۹۴۸۷	Sd17	۲۴
قنات آق تپه	۲ کیلومتر	, ۳۶.۶۲۳۹۸۰ ۵۷.۰۳۰۵۱۰	Sd18	۲۵



شکل ۴- دیاگرام pH-Eh در سیستم Cr-O-H در منابع آب (Fotherby, 2026). جایگاه نمونه‌های آب جفتای با توجه به pH-Eh، در بالا (نقطه سیاه) و پایین تر (نقطه آبی) قرار می‌گیرد که بیانگر شرایط اکسیدی و انحلال‌پذیری بالای کروم در داخل آب است. نقطه مشکی مربوط به کروم ۴ ظرفیتی و نقطه آبی مربوط به کروم ۳ ظرفیتی می‌باشد.



شکل ۵- نمودار پایپر که ترکیب کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی نمونه‌های آب زیرزمینی گرفته شده در سراسر منطقه را نشان می‌دهد، که براساس فاصله از معدن رنگ‌آمیزی شده است و نشان می‌دهد غلظت منیزیم با نزدیک شدن به معدن به صورت نسبی، افزایش یافته و آب‌ها از نوع بی‌کربنات کلسیک می‌باشند.



شکل ۶- رابطه بین دیاگرام پایپر با نوع سنگ بستر (Fotherby, 2026). دواپر فوق محدوده پلات شدن نمونه‌های آب منطقه جغتای را نشان می‌دهد و موید بی‌کربنات کلسیک بودن آب‌های منطقه جغتای است.

بحث و نتیجه‌گیری

حضور غلظت‌های بالای کروم (Cr) و منیزیم (Mg) در آب‌های زیرزمینی مناطق معدنی کرومیت، پیامد مستقیم فرآیندهای پیچیده ژئوشیمیایی، کانی‌شناسی و هیدرولوژیکی است که در طول هوازگی طبیعی، فعالیت‌های معدن‌کاری و تخلیه پساب‌های معدنی رخ می‌دهد. این پدیده نه تنها شاخص مهمی در ردیابی منشأ ژئوتئیک آلودگی‌های فلزی محسوب می‌شود، بلکه از منظر هیدروژئوشیمی، سلامت عمومی، اکوتوکسیکولوژی و مدیریت پایدار منابع آب نیز حائز اهمیت فراوان است. در ادامه، این موضوع در چند بخش تفصیلی شامل مبانی کانی‌شناسی، سینتیک واکنش‌های اکسیداسیون-احیا، هیدروژئوشیمی یون‌ها، شاخص‌های ژئوشیمیایی، و پیامدهای زیست‌محیطی بررسی می‌شود.

کانی کرومیت با فرمول شیمیایی عمومی $\text{Cr}_2\text{O}_4(\text{Fe}, \text{Mg})$ ، عضو گروه کانی‌های اسپینل و کانی اصلی اقتصادی کروم در سنگ‌های اولترامافیک و توده‌های افیولیتی است. ساختار کریستالی اسپینل از دو نوع کاتیون در دو موقعیت متفاوت تشکیل شده است: کاتیون‌های دوظرفیتی (Fe^{2+} یا Mg^{2+}) در

موقعیت‌های تتراهدرال، کاتیون‌های سه‌ظرفیتی (Cr^{3+}) در موقعیت‌های اکتاهدرال.

در بسیاری از ذخایر کرومیت، منیزیم می‌تواند به‌طور جزئی یا کامل جایگزین آهن شود و کانی کروم‌مگنیزیت با فرمول MgCr_2O_4 تشکیل گردد. این تنوع شیمیایی تأثیر مستقیمی بر پایداری اکسیداسیونی و نرخ انحلال کانی در شرایط سطحی دارد.

منیزیم در سیستم‌های کرومیت‌دار منشأ دوگانه دارد: در ساختار کرومیت: همان‌طور که اشاره شد، منیزیم می‌تواند در ساختار اسپینل حضور یابد، در کانی‌های سیلیکاتی اولترامافیک: منیزیم در کانی‌های زیر به‌وفور یافت می‌شود: اولیوین با فرمول $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ کانی اصلی در سنگ‌های پریدوتیتی و دونیتی سرپانتین با فرمول کلی $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ محصول هوازگی و دگرسانی اولیوین و پیروکسن‌های منیزیم‌دار مانند انستاتیت با فرمول MgSiO_3 این کانی‌ها در طول فرآیندهای دگرسانی هیدروترمال، سرپانتینی‌شدن و هوازگی سطحی، مقادیر قابل توجهی منیزیم را به فاز آبی آزاد می‌کنند.

در شرایط طبیعی، کروم در ساختار کرومیت به‌صورت سه‌ظرفیتی (Cr^{3+}) و در محیط‌های احیایی پایدار است. اما در مجاورت اکسیژن اتمسفر، آب‌های

منشأ اولترامافیک و دگرسانی سرپانتینی، نسبت Cr/Fe بالا: نشان‌دهنده غنی‌شدگی از کرومیت نسبت به کانی‌های آهن‌دار و حضور هم‌زمان Ni و Co تأییدکننده منشأ افیولیتی، زیرا این عناصر نیز در کانی‌های اولترامافیک غنی هستند.

حضور هم‌زمان $Cr(VI)$ و Mg^{2+} معمولاً نشان‌دهنده شرایط اکسیدی Eh مثبت، و pH قلیایی (۸ تا ۱۰.۵) در آبخوان است. در چنین شرایطی، کروم به صورت آنیونی (CrO_4^{2-}) پایدار است و توانایی بالایی برای مهاجرت در محیط‌های تخلخل‌دار دارد. در مقابل، در شرایط احیایی Eh منفی و pH خنثی، $Cr(VI)$ به $Cr(III)$ احیا شده و به صورت هیدروکسیدهای نامحلول $Cr(OH)_3$ رسوب می‌کند.

کروم شش‌ظرفیتی به شدت سمی، جهش‌زا و سرطان‌زا است. مکانیسم سمیت $Cr(VI)$ شامل ورود آسان به سلول‌ها از طریق کانال‌های آنیونی، احیای درون‌سلولی به $Cr(III)$ ، و تولید رادیکال‌های آزاد آسیب DNA است. سازمان جهانی بهداشت (WHO) حد مجاز کروم کل در آب شرب را ۵۰ $\mu g/L$ تعیین کرده است.

مدیریت هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی در مناطق معدنی کرومیت مستلزم درک عمیق از فرآیندهای کانی‌شناسی، سینتیک اکسیداسیون-احیا، و رفتار یون‌ها در محیط‌های آبی است. پایش مستمر غلظت‌های $Cr(VI)$ ، Mg^{2+} ، pH و Eh ، همراه با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی (نسبت‌های یونی، هم‌بستگی‌های عنصری) می‌تواند به تفکیک منشأ طبیعی و انسانی آلودگی کمک کند. همچنین، به‌کارگیری روش‌های پالایش مبتنی بر احیای شیمیایی، جذب سطحی و پالایش گیاهی، راهکارهای پایداری برای کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی و سلامت عمومی در این مناطق فراهم می‌آورد.

در بررسی مهاجرت و جابجایی کروم در پساب‌های معدنی منطقه جغتای نشان داد که در این پساب‌ها، غلظت بالای از کروم وجود دارد. غلظت کروم در محدوده مورد مطالعه از توزیع یکنواختی برخوردار نمی‌باشد، تعداد ۲۵ نمونه (۷ نمونه از پساب معدن و

سطحی و زیرزمینی غنی از اکسیژن، و در حضور کاتالیزورهای طبیعی مانند اکسیدهای منگنز (MnO_2)، کروم سه‌ظرفیتی به کروم شش‌ظرفیتی اکسید می‌شود. این فرآیند در pH قلیایی (بالای ۸) و پتانسیل اکسیداسیون-احیای مثبت ($Eh > +200$ mV) تسهیل می‌گردد.

کروم شش‌ظرفیتی به صورت آنیون کرومات (CrO_4^{2-}) یا دی‌کرومات ($Cr_2O_7^{2-}$) در محیط‌های آبی با pH قلیایی پایدار است و به دلیل حلالیت بالا، بار منفی و عدم تمایل به جذب سطحی بر روی کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن، به راحتی در آبخوان‌های متخلخل مهاجرت می‌کند.

این واکنش منیزیم دوظرفیتی (Mg^{2+}) را به فاز آبی وارد می‌کند Mg^{2+} . به دلیل شعاع یونی مناسب ($0.72 \text{ \AA}$)، انرژی هیدراتاسیون پایین و پایداری در pH بالا، در آب‌های زیرزمینی مناطق اولترامافیک به وفور یافت می‌شود. همچنین، در شرایط اکسیداسیون، Fe^{2+} حاصل از انحلال اولیوین می‌تواند به Fe^{3+} اکسید شده و به صورت $Fe(OH)_3$ رسوب کند، در حالی که Mg^{2+} در فاز محلول باقی می‌ماند.

کروم در محیط‌های آبی بسته به pH و Eh به اشکال مختلفی وجود دارد. منیزیم در آب‌های زیرزمینی به صورت یون آزاد Mg^{2+} یا کمپلکس‌های آبی مانند $MgHCO_3^+$ و $MgSO_4$ وجود دارد. در pH قلیایی، Mg^{2+} می‌تواند با کربنات و هیدروکسید واکنش داده و کانی‌های ثانویه مانند منیزیت $MgCO_3$ یا هیدروکسید منیزیم $Mg(OH)_2$ تشکیل دهد، اما در حضور غلظت‌های بالای سولفات یا کلرید، این رسوب‌گذاری محدود می‌شود.

هم‌بستگی مثبت بین غلظت‌های Mg^{2+} و $Cr(VI)$ در آب‌های زیرزمینی، شاخص مهمی برای منشأ ژئوژنیک (طبیعی) آلودگی کروم است. این هم‌بستگی در مطالعات هیدروژئوشیمیایی مناطق معدنی ایران مانند جغتای بدست آمده است. نسبت‌های یونی زیر به عنوان شاخص‌های تشخیصی استفاده می‌شوند: نسبت Mg/Ca بالا، نشان‌دهنده

۱۸ نمونه از قنات های آق تپه، درویش، قره قاچ) مورد آنالیز قرار گرفت. غلظت حداکثری کروم در پساب معدن 99.23 mg/l و غلظت حداکثری کروم در آب قنات ها 66.11 mg/l بدست آمد که بیانگر بالا بودن غلظت کروم از استاندارد اعلام شده سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2008) می باشد. همان طور که انتظار می رفت غلظت کروم در چشمه هایی که از مناطق افیولیتی نشات می گیرند بیشتر می باشد و با دور شدن از مناطق افیولیتی، غلظت کروم نیز کاهش یافت تا جایی که در بعضی نمونه ها مقدار این عنصر به حدود 15 mg/l رسید. به طور کلی در مناطق حاوی سنگ های اولترامافیک، دو نوع آب سطحی، تولید می شود که معمول ترین آن، نوع قلیایی با $\text{pH}=8.6$ - 8.3 و غنی از بیکربنات منیزیم می باشد. نوع دوم که کمتر دیده می شود حاوی هیدروکسید کلسیم بالا با مقدار $11.8 - 11.2 \text{ pH}$ می باشد.

در بررسی های انجام گرفته در ایتالیا و مکزیک، تیپ آب در اکثر مناطق افیولیتی از نوع Ca-HCO_3 و Mg-HCO_3 می باشد که حاصل هوازدگی سنگ های اولترامافیک سرپانتینیتی شده و یا به طور کلی سنگ های کلسیم و منیزیم دار (از قبیل گابرو یا بازالت) می باشند که حاوی کروم (III) و (VI) ظرفیتی باشند. آب های تیپ بی کربنات های منیزیک، معمولاً از طریق برهم کنش آب های جوی با سرپانتین و سنگ های اولترامافیک تولید می شوند، در حالی که آب های تیپ بی کربنات کلسیک از طریق برهم کنش آب های جوی با سنگ های گابرو و بازالتی به وجود می آیند. آب های تیپ بی کربنات منیزیک نسبت به کلسیک، از کروم غنی ترند [۲۷،۶،۷]. منطقه مورد مطالعه، منطقه آلوده ای است، زیرا تمرکز کروم در آب های غیر آلوده کمتر از 51 ppb می باشد [۳،۹]. اما سایر داده ها نشان دهنده مقادیر بالاتر از 51 ppb می باشد که نشان می دهد فرآیندهای هیدرولوژیکی و هیدروشیمیایی، انحلال کروم را کنترل می کنند. رس ها به دلیل داشتن سطح ویژه بسیار بزرگ، پایداری شیمیایی و مکانیکی، ساختارها و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا (CEC)، جاذب های بسیار خوبی در

جذب و بی تحرک کردن آلاینده ها می باشند. براساس یافته های تحقیق عوامل مؤثر در انتقال آلاینده گی کروم و سایر فلزات سنگین در منطقه جغتای به شرح زیر شناسایی شدند: وجود معدن کاری کرومیت و حفاری برای استخراج فلزات سنگین و مواد معدنی، سرعت و جهت و مدت وزش بادهای موسمی و منطقه ای و توده های جریان های بادخیز در منطقه، وجود منابع آب های جاری سطحی و زیرزمینی در اطراف مناطق آلوده، شیب بستر و سرعت و حجم جریان آب های جاری سطحی و زیرزمینی، وجود قنات های متعدد منطقه جغتای که تعداد آن ها به ده ها حلقه قنات می رسد، شیوه های مورد استفاده برای معدن کاری و انتقال مواد معدنی به کارخانه های فرآوری و همچنین روش های فرآوری مواد معدنی.

نتایج آنالیزهای شیمیایی نمونه آب قنات ها و پساب معدن کرومیت منطقه جغتای نشان داد که غلظت کروم در آب قنات و پساب های معادن بیشتر از حد مجاز می باشد. آنالیز نمونه های آب با روش طیفسنجی جذب اتمی (AAS)، انجام شد. نتایج آنالیزهای شیمیایی نمونه آب از منابع مختلف منطقه جغتای و پساب های معدن کرومیتی منطقه در این تحقیق، نشان داد که واحدهای افیولیتی و پساب معدن کرومیت، هر دو دارای غلظت بالایی از کروم می باشند که عمدتاً در شکل کروم (IV) و یون کرومات (CrO_4^{2-})، در آب وجود دارند. تعداد ۲۵ نمونه (۷ نمونه از پساب معدن و ۱۸ نمونه از قنات های آق تپه، درویش، قره قاچ) مورد آنالیز قرار گرفت که غلظت حداکثری کروم در پساب معدن 99.23 mg/l و غلظت حداکثری کروم در آب قنات ها 66.11 mg/l بدست آمد. غلظت نسبتاً بالای کروم در آب قنات، متأثر از عوامل طبیعی (عبور آب از بستر سنگ های افیولیتی آبخوان) و غلظت بالای کروم در پساب معدن، ناشی از فعالیت معدن کاری است.

چند نمونه از منابع آب قنات های منطقه نیز از نظر کروم مقدار بالاتری از حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) داشته که به عنوان آب

آلوده تشخیص داده شدند که نشان دهنده آلاینده‌گی منابع آب توسط واحدهای افیولیتی است. با توجه به pH قلیایی نمونه‌ها و محلول بودن کروم (VI) در شرایط قلیایی، می‌توان نتیجه گرفت بخشی از کروم در منابع آب منطقه از نوع کروم (VI) و به فرم کرومات (CrO_4^{2-}) می‌باشد که برای سلامتی انسان مضر می‌باشد [۱۰، ۲۷].

pHها اغلب قلیایی و حد واسط هستند. EC نمونه‌های آب نیز دارای مقادیر بالایی می‌باشد (در پساب معدنی تا ۴۵۰۰ و آب قنات تا ۱۰۵۰) که بیانگر افزایش چشمگیر یون‌های محلول و تماس و برهم‌کنش و انحلال بالای یون‌های سنگ‌های افیولیتی در داخل آب است که هم‌جنس غنی از فلزات سنگین سنگ دربرگیرنده آبخوان و هم پساب معدنی را کاملاً توجیه می‌کند، زیرا اعداد بالای ۱۰۰۰، نشان دهنده افزایش یون‌های محلول و ورود یون‌های مختلف به داخل آب است.

به‌صورت نسبی، هر چقدر نقاط نمونه‌برداری شده به معدن نزدیک‌تر می‌شوند، غلظت کروم و منیزیم آن‌ها افزایش می‌یابد اما استثناهایی نیز وجود دارد که برخی نقاط نمونه‌برداری آب قنات دارای کروم نسبتاً بالایی است و دلیل این موضوع نه معدن‌کاری بلکه ساختار به‌شدت تکتونیزه و خرد شده منطقه است که گسل‌ها باعث تغییر موقعیت لایه‌های سنگ‌های افیولیتی و آلتراسیون‌ها و متاسوماتاسیس‌های گوناگون در سنگ‌ها شده که می‌تواند به‌صورت کاملاً طبیعی، غلظت کروم و منیزیم را بدون دخالت انسانی افزایش دهد اما به‌صورت کلی می‌توان این نتیجه را گرفت که پساب‌های معدنی دارای غلظت بالاتری از کروم و منیزیم نسبت به آب قنات‌ها هستند اما در عین حال چون منبع تغذیه قنات‌ها هم دقیقاً همان ارتفاعات افیولیتی است پس غلظت کروم و منیزیم به شکل طبیعی نیز بالاست.

براساس پراکنش نمونه‌ها در نمودار پایپر، تیپ هیدروشیمیایی غالب آب‌های مورد مطالعه از نوع بی‌کربنات کلسیک است که بیانگر چیرگی یون‌های کلسیم و بی‌کربنات در ترکیب شیمیایی آب می‌باشد.

این الگو معمولاً نشان‌دهنده آن است که منشأ اصلی یون‌های محلول، فرآیندهای انحلالی مرتبط با سنگ‌های کربناته، به‌ویژه افیولیت و در مواردی دولومیت، در محدوده تغذیه و مسیر جریان آب زیرزمینی است. غلبه کلسیم در بخش کاتیونی، از یک‌سو می‌تواند به انحلال کربنات کلسیم و از سوی دیگر به واکنش‌های آب-سنگ در محیط‌های کربناته نسبت داده شود. این موضوع نشان می‌دهد که آب در مسیر حرکت خود، تماس مؤثری با واحدهای زمین‌شناسی کربناته داشته و ترکیب آن عمدتاً تحت کنترل فرایندهای ژئوشیمیایی طبیعی شکل گرفته است. حضور منیزیم در مقادیر بالا در برخی نمونه‌ها، نشانه‌ای از مشارکت سنگ‌های دولومیتی، مارنی یا واحدهای کربناته منیزیم‌دار در تغذیه آبخوان است. افزایش منیزیم همچنین می‌تواند به معنای تشدید انحلال کانی‌ها در بخش‌هایی از مسیر جریان یا افزایش زمان تماس آب با محیط سنگی باشد. از دیدگاه هیدروژئوشیمیایی، ترکیب بی‌کربنات کلسیک همراه با Mg بالا معمولاً بیانگر یک سامانه نسبتاً تکامل‌یافته، اما هنوز تحت سلطه فرآیندهای انحلالی است.

مطابقت، دیاگرام pH-Eh در سیستم Cr-O-OH با داده‌های تحقیق حاضر، بیان می‌کند که کروم در شرایط شیمیایی منطقه جغتای از نظر ترمودینامیکی، پایدارنسبی داشته و در این محیط، تمایل به محلول‌ماندن و اکسیدشدن دارد و تمایل کمتری به رسوب کردن از خود نشان می‌دهد.

نظر به اهمیت نقش آلاینده‌گی آب‌های جاری سطحی و زیرزمینی در منطقه جغتای به کروم و منیزیم (درصد بالای منیزیم نیز دارای عوارض منفی می‌باشد)، لذا براساس یافته‌ها و اهداف تعیین شده در تحقیق حاضر، پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

۱. رعایت اصول علمی معدن‌کاری و بکاربردن شیوه‌های مدرن و استاندارد معدن‌کاری برای استخراج کروم و سایر فلزات سنگین.

۲. شناسایی و جداسازی مناطق آلوده (به‌ویژه مناطق معدن‌کاری) و منابع آب‌های قنات‌ها، جهت کنترل

و بسیاری از آلاینده‌های ریز است که برخلاف اسمز طبیعی عمل می‌کند. در این روش، با اعمال فشاری بیشتر از فشار اسمزی بر آب خوراک، مولکول‌های آب از غشای نیمه‌تراوا عبور می‌کنند و بخش عمده ناخالصی‌ها در جریان تغلیظ‌شده باقی می‌مانند. در روش RO، جداسازی فقط بر پایه اندازه نیست، بلکه اندازه، بار الکتریکی، قطبیت و رفتار هیدراتاسیون یون‌ها نیز نقش دارند به همین دلیل، یون‌های دوظرفیتی و ذرات باردار معمولاً بهتر از گونه‌های خنثی یا تک‌ظرفیتی حذف می‌شوند و این روش برای فلزات سنگین و مخصوصاً کروم و منیزیم بسیار مناسب و کارآمد است. همچنین با توجه به شدت بالای تابش نور خورشید در منطقه جغتای، انرژی مورد نیاز برای تصفیه آب را می‌توان به سهولت از انرژی خورشیدی، تامین نمود که در این منطقه دارای راندمان بالایی است و با هزینه پایین می‌توان آب قنات‌ها و پساب را تصفیه و سالم‌سازی کرد.

سطح آلودگی آب‌ها و نیز جلوگیری از انتشار آلاینده‌گی به منابع آبی دیگر در منطقه جغتای.

۳. پایش دوره‌ای، ایجاد حوضچه‌های کنترل پساب، مدیریت باطله‌های معدنی، جلوگیری از ورود رواناب به محدوده باطله‌ها، اصلاح زهکشی و تصفیه هدفمند.

۴. جلوگیری از ورود آب‌های آلوده و پساب‌های حاصل از معدن‌کاری به جریان‌های اصلی آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه و انتقال پساب‌ها و آب‌های آلوده

۵. تغییر جهت چشمه‌ها و جریان‌های آبی سطحی و زیرزمینی نزدیک به محوطه‌های آلوده و منحرف کردن مسیر جریان‌های آبی با فاصله مطمئن از مناطق آلوده به‌ویژه مناطق معدن‌کاری در منطقه.

۶. ایجاد سیستم تصفیه آب قنات و سیستم تصفیه آب پساب معدن کرومیت. پیشنهاد می‌شود از روش اسمز معکوس یا RO برای تصفیه آب قنات‌ها و پساب‌های معدنی منطقه جغتای، استفاده شود. روش اسمز معکوس یا RO فرایند غشایی فشارمحور برای جداسازی آب از املاح محلول، یون‌ها، ذرات کلوئیدی

References

- [1]. Atabaki, M., Lotfi, A. (2018). Investigation of heavy metal concentrations (lead, cadmium, zinc and copper) in soil of Isfahan regions in 2017, *Journal of Research in Environmental Health*, 4(1), <https://doi.org/10.22038/jreh.2018.31176>. 1211 [in Farsi]
- [2]. Amini, B. (1999). Geological map 1:100,000 Meshkan, Geological and Mineral Exploration Organization of Iran.
- [3]. Babaei, H. and Khodami, N. (2018). Investigation of environmental pollution of soils around the Mehdi Abad lead and zinc mine in Yazd, *Quarterly Journal of Environmental Science and Technology*, online publication. [in Farsi]
- [4]. Poursoltani, M., Kazemi, N., Fazelolipour, M. (2019). The effect of sedimentary units on water composition and quality: An example from the Kardeh catchment basin, northeast of Mashhad, Iran, *Scientific Research Journal of Sedimentary Facies*, 12(1): pp. 35-52.
- 10.22067/sed.facies.v12i1.67331. [in Farsi]
- [5]. Tarshizian, H., Atari, M., Mamdohi, M., Eshaq Elbeigi, S. (2016). Environmental investigation of heavy metal contamination in water and soil resources of Sangbast area, *Geochemistry Journal*, 5 (3), 243-252. [in Farsi]
- [6]. Hassan Zadeh, B., Abbas Nejad, A. (2018). Hydrogeochemical processes affecting the quality of groundwater resources in the middle part of Dasht-e Noq (West Kerman Province), *Journal of Hydrogeology*, 3(2), 46-58. 10.22034/hydro.2019.6690 [in Farsi]
- [7]. Khormanjadian, Sh., Azadeh Ranjbar, A., Asemi Zavareh, S. R., Pandashte, A. (2019). Determination of heavy metal accumulation in soil and plants around mines and their bioavailability (case study of Nakhlak lead mine), *Quarterly Journal of Environmental Science Studies*, 5(4), 3052-3058. [in Farsi]
- [8]. Fazel Valipour, M.A. (2019). Assessment of heavy metal

- contamination in agricultural soil south of Bardaskan (Khorasan Razavi Province), *Quarterly Journal of Environmental Geology*, 15(54), 63-80 [in Farsi]
- [9]. Mohammad Rezapour Tabari, M., Salehi Dopolani, P. (2019). Analysis of groundwater contamination using a ranking approach similar to the fuzzy ideal solution (Case study: Zanjan Plain), *Quarterly Journal of Environmental Science and Technology*, 22(6), 101-116. [in Farsi]
- [10]. Govil, P., Reddy, G., & Krishna, A. (2001). Contamination of soil due to heavy metals in the Patancheru industrial development area, Andhra Pradesh, India. *Environmental geology*, 41(3), 461-469. Govil, P., Reddy, G. and Krishan, A. (2001). Contamination of soil due to heavy metals in the patancheru industrial development area, Anhedra Pradesh, India. *Enviromental Geology*, 41:461-469.
- [11]. Lentini, P., Zanolli, L., Granata, A., Signocelli, S. S., Castelino, P., Dell Aquila, R. (2017). Kidney and heavy metals- The role of environmental exposure. *Molecular medicine reports*. 15(5). pp: 3413- 3419.
- [12]. Matta, G., Gjyli, L. (2016). Mercury, lead and arsenic, impact on environment and human health. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 9. P 718-725.
- [13]. Mendes, M.P., Salomao, A.L.S., Niemeyer, J.C. and Marques, M. (2017). Ecological Risk Assessment in a Tropical Wetland contaminated with gasoline: Tier Human and Ecological Risk Assessment: *An International Journal*, 23(5): 992-1007.
- [14]. Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I., Akash, M. S. H. (2018). Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of cellular biochemistry*. 119(1). P 157-184.
- [15]. Zhong, T., Xue, D., Zhao, L., Zhang, X. (2018). Concentration of heavy metals in vegetables and potential health risk assessment in China. *Environ Geochem Health*. 40(1), 313-322.
- [16]. Uysal, I.T., Golding, S.D. and Glikson, M. (2000). Petrographic and isotope constraints on the origin of authigenic carbonate minerals and the associated fluid evolution in Late Permian coal measures, Bowen Basin (Queensland). *Australia. Sedimentary Geology*, 136: 189_206. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00097-X](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00097-X).
- [17]. Hadia, F., Ambreen, A. (2017). Heavy metal pollution-A mini review, *Journal of Bacteriology and Mycology*, 6(3): 179-189.
- [18]. Fotherby, A., Panda, B., Chakraborty, A., Baker, K., Crozier, S., Chakrabarti, R., & Turchyn, A. V. (2026). An exploration of groundwater chromium contamination from a chromite mine, Sukinda, India. *Applied Geochemistry*, 106865. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2026.106865>.
- [19]. Sharma, S. K. (2014). Heavy metals in water: presence, remonal and safety. Royal society of Chemistry.
- [20]. Luo, M., Zhang, Y., Li, H., Hu, W., Xiao, K., Yu, S., ... & Wang, X. (2022). Pollution assessment and sources of dissolved heavy metals in coastal water of a highly urbanized coastal area: The role of groundwater discharge. *Science of the Total Environment*, 807, 151070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151070>.
- [21]. Kapsi, M., Tsoutsis, C., Paschalidou, A. and Albanis, T., 2019. Environmental monitoring and risk assessment of pesticide residues in surface waters of the Louros River (NW Greece). *Science of the Total Environment*, 650, pp.2188-2198. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.185>.
- [22]. Janisarnavi, T. and Shahrokhi , S., 2022. Assess groundwater quality with help of Hydrochemical parameters (Case study: in Gheydar area, Zanjan Province). *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(3), 289-305. [in Farsi]

- [23]. Jaiswal, A., Arpit, V., and Pallavi, J., 2018. Detrimental effects of heavy metals in soil, plants, and aquatic ecosystems and in humans. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology*. 37(3), pp.183-197. DOI:10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2018025348.
- [24]. Huihui, Z., Xin, L., Zisong, X., Yue, W., Zhiyuan, T., Meijun, A., ... & Guangyu, S. (2020). Toxic effects of heavy metals Pb and Cd on mulberry (*Morus alba* L.) seedling leaves: Photosynthetic function and reactive oxygen species (ROS) metabolism responses. *Ecotoxicology and environmental safety*, 195, 110469. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110469>.
- [25]. Rahman, M., Paul, M., Bhounik, N., Hassan, M., Alam, M., and Aktar, Z. 2020. Heavy metal pollution assessment in the groundwater of the Meghna Ghat industrial area, Bangladesh, by using water pollution indices approach. *Applied Water Science*, 10 (8), pp. 1-15.
- [26]. Rizk, R., Juzsakova, T., Rawash, M., Domokos, E., Hedfi. A., and Rédey, Á. 2022. Comprehensive environmental assessment of heavy metal contamination of surface water, sediments and Nile Tilapia in Lake Nasser, Egypt. *Journal of King Saud University-Science*, 34(1), pp. 101748. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101748>.
- [27]. Sargholzaei S, Frashi A, Safari O. 2017. Evaluation of ecosystem health using bio- integration index (B-IBI) (Case study: Kardeh River). *14th National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran*. 22059/ije.2020.308851.1376. [in Farsi]
- [28]. Thukral, A., and Rodrigo-Comino, J. 2020. Assessment of heavy-metal pollution in three different Indian water bodies by combination of multivariate analysis and water pollution indices. *Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal*, 26(1), pp. 1-16. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1497946>.
- [29]. Zaynab, M., Al-Yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M. and Li, S. 2022. Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University-Science*. 34(1). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101653>.
- [30]. Zhang, J., Guo, L., Deng, Z., Wang, D. and Liu, L., 2021. Assessment of heavy metal pollution and water quality characteristics of the reservoir control reaches in the middle Han River, China. *Science of The Total Environment*, 799(6), pp (149472). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149472>.
- [31]. Zhushan, F. and Shuhua Xi. 2020. The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 3, pp. 167-176. <https://doi.org/10.1080/15376516.2019.1701594>.
- [32]. Zoqi, M. J., Ayobi, M., & Khataei, B. 2023. Efficiency of various binders in solidification/stabilization of heavy metals and compressive strength in sludge of Ceramic tile factory Niloufar in Birjand. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(4), 741-756.
- [33]. Malamis, S., Katsou, E., Takopoulos, K., Demetriou, P., & Loizidou, M. (2012). Assessment of metal removal, biomass activity and RO concentrate treatment in a membrane bioreactor-reverse osmosis system. *Journal of Hazardous Materials*, 209–210, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.085>.
- [34]. Yu, H.-Y., Gupta, S., & Zhou, Z. (2024). Removal of metals and assimilable organic carbon by activated carbon and reverse osmosis point-of-use systems. *Chemosphere*, 365, 143251. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143251>.
- [35]. Rahman, M. A., Adarsh, A., Hasnain, S. M. M., Paramasivam, P., & Dabelo, L. H. (2025). Review of solar-powered reverse osmosis desalination systems: Structure, performance, and efficiency.

- Water Science and Technology*, 92(8), 1077–1103. <https://doi.org/10.2166/wst.2025.141>
- [36]. Shalaby, S. M., Elsheikh, A. H., & Essa, F. A. (2022). Reverse osmosis desalination systems powered by solar energy: Preheating techniques and brine disposal challenges. *Energy Conversion and Management*, 254, 115232. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115232>
- [37]. Kumar, P., Sharma, R., & Singh, A. (2025). Hexavalent chromium at the crossroads of science, *environment and public health*. RSC Advances. <https://doi.org/10.1039/D5RA03104D>

Geochemical Evaluation of Groundwater and Mineral Wastewater In The Area of Joghatay Chromite Mine In Khorasan Razavi (Research Paper)

1- Moslem Yazdani*, PhD Graduate, Department of Science, Faculty of Science, Ashford University, California, USA.

Yazdani.moslem@yahoo.com

2- Fariba Foroughi, Assistant Professor, Department of Stratigraphy, School of Geology, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Sanaz Majidian, MSc Graduate, Department of Mining, School of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 16 Jun. 2026

Accepted: 28 Jul. 2026

Abstract

Chromite (FeCr_2O_4) is the most important chromium mineral ore that occurs in ultrabasic rocks and ophiolites, and in these rocks, chromium is usually associated with magnesium, iron, nickel, and cobalt. The Joghatay chromite mining area is located in the northwest of the Sabzevar ophiolite zone and has a hot and dry foothill climate. This mining area has several exploration-extraction trenches that are mined using open-pit mining techniques. Groundwater in this area flows in the form of springs caused by erosion faults and aqueducts dug in alluvial plains. The hydrogeochemistry of the aqueduct water and mineral effluent in this area was investigated using atomic absorption spectrometry (AAS) to analyze water samples. The results of chemical analysis of water samples from the Qanats of the Chaghatai region and the chromite mine effluents showed that both ophiolite units and chromite mine effluents have high concentrations of chromium and magnesium, with chromium mainly present in the form of chromium (IV) and chromate ion (CrO_4^{-2}). A total of 25 samples (7 samples from mine effluents and 18 samples from the Aqtapeh, Darvish, and Qaraghach qanats) were analyzed, and the maximum concentration of chromium in the mine effluent was 99.23 mg/l and the maximum concentration of chromium in the qanat water was 66.11 mg/l, both of which are higher than the international standard. The relatively high concentration of chromium in the qanat water is affected by natural factors (water passing through the ophiolite bedrock of the aquifer) and the high concentration of chromium in the mineral effluent is due to mining activity. Drawing a Papier diagram for water samples indicates high levels of magnesium, which is indicative of calcium bicarbonate springs, and the high EC levels of water samples prove high dissolution of dissolved ions from ophiolite bedrock in water.

Keywords: Hydrogeochemistry, Chromite, Mineral Wastewater, Aqueduct Water, Sabzevar-Joghatay Belt, Heavy Metals.