

ارزیابی هیدروژئولوژیکی سایت هیپ لیچینگ معدن مس سونگون (آذربایجان شرقی) و تحلیل پتانسیل آلودگی زیست محیطی

وهاب امیری^{۱*}

۱- استادیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه یزد، یزد

* نویسنده مسئول: v.amiri@yazd.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳

چکیده

رها سازی سیالات سمی از سایت هیپ لیچینگ به محیط زیست می تواند سلامت اکوسیستم و جمعیت های انسانی اطراف آن را تحت تأثیر قرار دهد. شناخت شرایط هیدروژئولوژیکی مبتنی بر رفتار هیدروژئوشیمیایی منابع آبی در ساختگاه سایت هیپ لیچینگ معدن مس سونگون به عنوان مهمترین اقدامی که باید در پیشگیری از مشکلات زیست محیطی محتمل انجام شود؛ راه را برای توسعه پایدار در محل این معدن هموار می سازد. در این مطالعه سعی شده است از بازدهای صحرایی، نمونه برداری از منابع آب زیرزمینی، مطالعات ژئوفیزیکی، مطالعات ژئوتکنیکی و مدل سازی معکوس ژئوشیمیایی برای تحلیل و وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه استفاده شود. وجود شبکه درز و شکاف ها و توسعه آنها تا اعماق زیاد نشان می دهد که برخی مسیرهای ترجیحی عمیق را می توان برای جریان آب در این منطقه در نظر گرفت. هدایت آب از شبکه درز و شکافدار به مناطقی با شکستگی بیشتر ناشی از گسل خوردگی و در کنار آن تمایل گرا دیان هیدرولیکی و همچنین وضعیت توپوگرافی منطقه به سمت مناطق جنوبی موجب شده است که سطح ترشده گی وسیعی در این محدوده مشاهده شود. با توجه به تحلیل شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه، به نظر می رسد که پتانسیل تشکیلات و ساختارهای زمین شناسی منطقه و همچنین شبکه درز و شکافی موجود در این محدوده توان انتقال و ذخیره سازی بالای آب را ندارد. از طرفی دیگر نیز باید عنوان داشت که توان هیدروژئولوژیکی و اقلیمی منطقه در تأمین حجم قابل توجهی آب را ندارد و همین امر مانع تشکیل منابع آب زیرزمینی و یا به تعبیری آبخوان در این منطقه شده است. بنابراین، پتانسیل ایجاد مشکلات زیست محیطی در این سایت به دلیل نشت از لاینر سایت هیپ لیچینگ و همچنین آلودگی در وسعت نگران کننده وجود نخواهد داشت. با این وجود، ایجاد و توسعه تأسیساتی برای زهکشی آب های تجمع یافته در سطح و نزدیک سطح زمین می تواند میزان ریسک ایجاد مشکلات زیست محیطی را به کمترین مقدار برساند.

واژه های کلیدی: معدن مس سونگون، هیپ لیچینگ، هیدروژئولوژی، مدل سازی معکوس ژئوشیمیایی.

مقدمه

تابعی از عوامل مختلفی همچون خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ماده معدنی (حجم و واکنش پذیری ماده معدنی)، پتانسیل نرخ تولید اسید، خصوصیات کمی و کیفی آب زیرزمینی، اقدامات و فرایندهای معدنکاری و سن معدن می باشد (نورداستروم، ۲۰۱۱). در بسیاری از محیط هایی که منابع آب سطحی محدودی وجود دارد، آب زیرزمینی مهمترین مولفه محیطی است که در معرض خطر قرار دارد. یکی از مسیرهایی که منجر به انتقال آلودگی های

در فرایند توسعه کشورها، معدن کاری به عنوان یکی از تأثیرگذارترین صنایع شناخته می شود که خواسته یا ناخواسته منجر به تخریب محیط زیست می شود. به منظور دستیابی به توسعه پایدار، عناصر حفاظت محیط زیست باید در مرحله برنامه ریزی پروژه های معدنکاری لحاظ گردد. میزان تأثیرگذاری معدنکاری بر کیفیت محیط زیست و از آنجمله آب زیرزمینی

استحصال و جداسازی مواد با ارزش آنها به روش‌های مرسوم وجود ندارد. معدن مس سونگون به عنوان دومین ذخیره بزرگ مس کشور (واقع در استان آذربایجان غربی) نیز از این قاعده مستثنی نبوده و در چند سال اخیر، مطالعه و اجرایی نمودن پروژه هیپ لیچینگ به عنوان رایج‌ترین روش شناخته شده در رفع معضل مواد معدنی کم عیار در محدوده معادن در دستور کار قرار گرفته است.

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در مرحله طراحی این سایت، ظرفیت خوراک طرح هیپ لیچینگ معدن مس سونگون سالانه در حدود ۲ میلیون تن سنگ معدنی با عیار ۰/۳ درصد خواهد بود و میزان تولید سالانه آن نیز در حدود ۳ هزار تن مس کاند با خلوص ۹۹/۹۹ درصد خواهد بود. اجرای طرح هیپ لیچینگ، کارخانه‌ها و بخش‌های وابسته به آن در زمینی به مساحت ۴۸ هکتار صورت خواهد گرفت. بنابراین با توجه به پتانسیل بالای اینگونه اقدامات معدنی و استحصال مواد معدنی در تخریب محیط زیست، هرگونه طراحی و بهره‌برداری از چنین پروژه‌هایی باید با اولویت رعایت اصول زیست‌محیطی انجام شود.

در این مطالعه سعی شده است که با استفاده از بازدیدهای میدانی، نمونه برداری از منابع مختلف و تحلیل مطالعات مشابه، شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه مورد ارزیابی کارشناسی قرار گیرد. شناخت شرایط هیدروژئولوژیکی مبتنی بر رفتار هیدروژئوشیمیایی منابع آبی در ساختگاه سایت هیپ لیچینگ به عنوان مهمترین اقدامی که باید در پیشگیری از مشکلات زیست محیطی محتمل انجام شود؛ راه را برای توسعه پایدار در محل این معدن هموار می‌سازد.

مواد و روش‌ها

موقعیت و زمین‌شناسی عمومی منطقه

معدن مس سونگون در استان آذربایجان شرقی واقع شده و فاصله این کانسار از شهر تبریز ۱۳۰ کیلومتر و از ورزقان ۳۰ کیلومتر است. این معدن در یک منطقه کوهستانی با متوسط ارتفاع ۲۰۰۰ متر بالای سطح دریا واقع شده و در شمال غربی ایران بر روی کمر بند مس جهانی قرار دارد. معدن مس پورفیری سونگون در یک استوک دیوریت/گرانودیوریت تا کوارتز

به درون آبخوان‌ها و یا منابع آب زیرزمینی می‌شوند شامل نشت از حوضچه‌ها و استخرهای ذخیره سازی مواد و یا نشت از لایر برخی سازه‌ها همچون لندفیل‌ها و سایت‌های هیپ لیچینگ می‌باشد (مونکور و همکاران، ۲۰۰۵؛ داکات و همکاران، ۲۰۰۸). امروزه استحصال فلزات و مواد معدنی ارزشمند از طریق حلال‌ها که در سایت‌های هیپ لیچینگ صورت می‌گیرد، روشی نوین و در عین حال بسیار فراگیر در استفاده مجدد از مواد معدنی با عیار پایین می‌باشد. هیپ لیچینگ فرایندی است که طی آن ماده‌ای مشخص، با انحلال در حلالی معین از ماده جامد در برگیرنده خود جدا شده و سپس ماده هدف به روش‌های مختلف از حلال استخراج می‌شود. از این روش فرایندی استخراج در استحصال مواد معدنی از سنگ‌های معدنی به وسیله اسید مانند استخراج مس از سنگ معدن به وسیله اسید سولفوریک رقیق استفاده می‌شود.

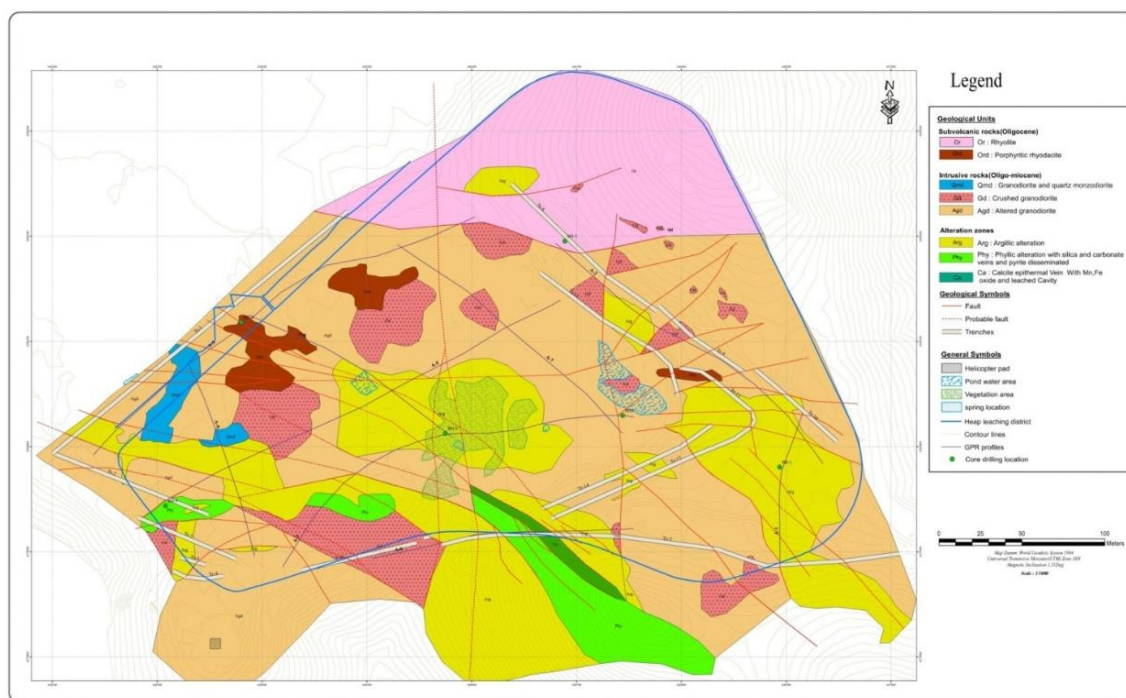
هیپ لیچینگ به عنوان یک روش هیدرومتالورژی بسیار اقتصادی جهت استخراج فلزات از مواد معدنی کم عیار شناخته می‌شود (ایلانکون و نیثلینگ، ۲۰۱۶، ایلانکون و همکاران، ۲۰۱۸). حلال استفاده شده در این روش تابعی از ترکیب کانی‌شناسی ماده معدنی است. در این روش، مواد انحلال یافته و نشتی حاوی غلظت‌های بالایی از فلزات سنگین متعددی می‌باشند که در مراحل بعدی باید مورد فرآوری و جدایش قرار گیرند (بنی اسدی و همکاران، ۲۰۰۸، تایل و اسمیت، ۲۰۰۴). به دلیل اهمیت و ملاحظات زیست‌محیطی در فعالیت‌های معدنی، مطالعات مختلفی به ارزیابی خطر نشت مواد اسیدی از محل دپوی مواد معدنی و همچنین برخی تأسیسات فرآوری مواد معدنی همچون سایت‌های هیپ لیچینگ مبادرت نموده‌اند (نورداستروم، ۲۰۱۱، داکات و همکاران، ۲۰۰۸، ایلانکون و همکاران، ۲۰۱۸، دیویس و همکاران، ۲۰۱۰، گویونت و توزه-فولتز، ۲۰۱۴).

همان طوری که پیش از این ذکر شد، یکی از مهمترین چالش‌هایی موجود در سایت‌های معدنی که یافتن راه حلی برای برون رفت از آن در اولویت معادن مختلف وجود دارد، دپوی حجم عظیمی از مواد معدنی با خلوص و عیار پایین است که امکان

استخراج آن (با توجه به اکتشافات انجام گرفته) حدود ۷۹۶ میلیون تن برآورد شده است که در مجموع کل ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن در محدوده کانسار سونگون ورزقان حدود ۷/۱ میلیارد تن سنگ مس با عیار ۶۱٪ است.

در این مطالعه به تحلیل وضعیت ساختگاه سایت هیپ لیچینگ معدن مس سونگون و ارزیابی رفتار هیدروژئولوژیکی منطقه پرداخته شده است. در شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی بر روی نقشه زمین شناسی نمایش داده شده است. همچنین برخی برداشتهای صحرایی که در بخشهای مختلف این مطالعه به آنها ارجاع داده شده است از قبیل ترانشه ها موجود در اطراف محدوده، گمانه های ژئوتکنیکی و محدوده تجمع آب نیز نمایش داده شده است.

مونزونیتی تزریقی در سنگ های رسوبی-آتشفشانی ائوسن و کربنات های کرتاسه، تشکیل شده است. تشکیل و تجمع مس اصولاً در دگرسانی پتاسیک و در برخی موارد همراه با دگرسانی سریسیتییک صورت گرفته است (هزارخانی و ویلامز جونز، ۱۹۹۸). این کانسار به صورت توده نفوذی، بر روی رشته کوه های ارسباران (قره داغ) قرار گرفته است. این رشته کوه ها با ۸۰ کیلومتر عرض بخشی از کمربند آندزیتی آلپ-همیالمیا می باشند. اختلاف ارتفاع در محدوده معدن حدود ۷۵۰ متر می باشد که سبب ایجاد توپوگرافی شدید و دامنه های پرشیب شده است. کانی سازی اصلی در دومین معدن بزرگ مس کشور با سهم ۴۰ درصدی تولید، شامل کانی های مس و مولیبدن است. ذخیره احتمالی این معدن بیش از یک میلیارد تن و ذخیره قابل



شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه بر روی نقشه

وضعیت هواشناسی منطقه

تغییرات اقلیمی در بلند مدت و همین طور تغییرات کوتاه مدت در هر منطقه تأثیرات قابل توجهی بر مقدار ذخیره آبی در سیستم آبی مناطق پوشیده از سازندهای سخت دارد. مطالعه مقدار بارندگی روزانه (تعیین عکس العمل چشمه ها با توجه به سیستم مجرای و درز و شکافدار و به تبع آن جریان سریع آب

در سیستم شکستگی) و سالانه (تعیین میزان ذخیره دینامیک شبکه آبی موجود در سازندهای سخت) می تواند اطلاعات ارزشمندی از وضعیت هیدروژئولوژیکی مناطق سازند سخت را در اختیار قرار دهد. همچنین، تغییرات دمایی به عنوان مولفه ای مهم در تغییر میزان تبخیر (از بارندگی بر روی سطح زمین و از آب موجود در شبکه هوازده بالایی، سازندهای سخت) به دلیل

تعیین امکان برهم کنش آب با محیط سنگی اطراف آن مورد استفاده قرار داد. در این زمینه، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب جهت تعیین منشأ اصلی هر نمونه و با استفاده از دیاگرام‌های استاندارد موجود برای این هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، با استفاده از مدل‌سازی ژئوشیمیایی معکوس می‌توان به میزان ارتباط آب با محیط اطراف از طریق تعیین پتانسیل انحلال، رسوبگذاری و یا تعادل آب با محیط پی برد. بنابراین، در این مطالعه سعی شده است از پتانسیل بالای مدل‌سازی معکوس ژئوشیمیایی جهت بررسی شرایط هیدروژئوشیمیایی منطقه و حصول نتایج قابل اعتماد استفاده شده است. شایان یادآوری است که تفسیر دقیق نتایج حاصل از گونه‌زایی در نمونه‌های آبی می‌تواند دیدگاه بسیار خوبی از وضعیت موجود در هر منطقه را در اختیار قرار دهد. در این پژوهش، از ۴ موقعیت انتخابی (بر اساس برونزد و نزدیکی به محدوده مورد نظر) جهت تهیه آب زیرزمینی و آنالیز پارامترهای فیزیکوشیمیایی استفاده شده است. در هر موقعیت نمونه‌برداری، نمونه‌ها در دو ظرف پلی‌اتیلنی با حجم ۵۰۰ سی‌سی ذخیره شد و به دو گروه تقسیم شدند که شامل: (۱) نمونه‌های اسیدی نشده برای آنالیز آنیون‌ها و (۲) نمونه‌های اسیدی شده (با چندین قطره اسید نیتریک با غلظت ۶۵٪، برند Merck آلمان) برای آنالیز کاتیون‌ها، عناصر اصلی و کمیاب خاکی است (ISO 5667-11، ۱۹۹۳، سهرابی و همکاران، ۲۰۱۷). موقعیت نمونه‌های تهیه شده و تصاویری از فرایند نمونه‌برداری در یک محل به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

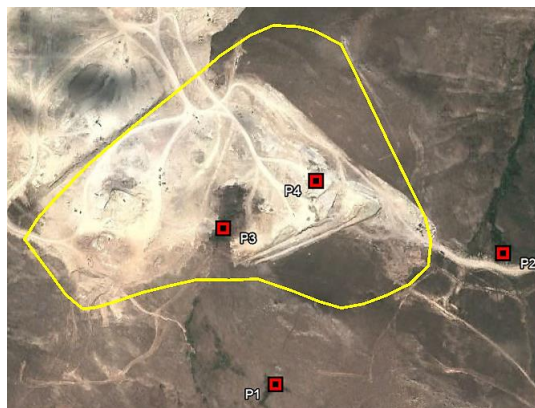
ایجاد تغییرات گاه‌آه قابل توجه در میزان بارندگی و همچنین رطوبت خاک (دای و همکاران، ۱۹۹۹) باید در مطالعات هیدروژئولوژیکی مورد توجه قرار گیرد.

در این مطالعه، از اطلاعات هواشناسی ثبت شده در ایستگاه هواشناسی ورزقان به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد نظر در بازه تقریباً سه ساله (اطلاعات پیوسته موجود تا زمان انجام این مطالعه) جهت بررسی تغییرات دمایی و بارشی در این منطقه استفاده شده است. در بازه زمانی مورد مطالعه، متوسط بارندگی روزانه معادل ۰/۹ میلیمتر و مجموع بارندگی صورت گرفته در این بازه معادل ۸۵۴/۳ میلی‌متر (نزدیک به ۲۸۵ میلیمتر در سال) می‌باشد. با توجه به اینکه اقلیم هر منطقه در زمره مهم‌ترین عوامل موثر در تخمین مقدار نفوذ ناشی از بارندگی قرار دارد، بررسی اقلیم منطقه با استفاده از اقلیم‌نمای آمبرژه (۱۹۵۵) مورد محاسبه قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد که اقلیم این محدوده از نوع خشک سرد می‌باشد.

بحث و نتایج

ارزیابی هیدروژئوشیمیایی سایت مورد مطالعه

از آنجائی که مطالعه حاضر با تأکید بر تعیین منشأ آب خروجی از چشمه‌های موجود در سایت هیپ لیچینگ معدن سونگون و تحلیل وضعیت هیدروژئولوژی منطقه انجام شده است، بررسی شیمی آب و تغییرات مکانی ویژگی‌های هیدروشیمیایی و همچنین هیدروژئوشیمیایی می‌تواند در این مهم بسیار سودمند باشد. با استفاده از تغییرات ایجاد شده در ترکیب شیمیایی آب، می‌توان آن را به عنوان یک ردیاب مناسب جهت



شکل ۲. موقعیت نمونه‌های آبی تهیه شده از محدوده سایت هیپ لیچینگ معدن مس سونگون و اطراف آن (نمای تصویر به سمت شمال شرق)

نمونه‌های تهیه شده در دمای ۴ درجه سانتیگراد نگهداری شده و با حفظ این شرایط به شرکت مطالعات مواد معدنی زرآما انتقال داده شد و مورد آنالیز قرار گرفت.



در هر نقطه نمونه‌برداری، مقادیر پتانسیل اکسیداسیون- احیا (Eh یا ORP)، pH، دما یا T و هدایت الکتریکی (EC) در محل نمونه‌برداری و با استفاده از یک دستگاه مولتی پارامترسنج TES-1381 (ساخت تایوان) تعیین شد (شکل ۳- سمت چپ).



شکل ۳. نمایی از نمونه‌برداری آب توسط نویسنده در محدوده سایت هیپ لیچینگ (سمت راست) و تجهیزات سنجنده همراه جهت اندازه‌گیری برخی پارامترهای فیزیکی آب در محل نمونه‌برداری (سمت چپ)

کالیبراسیون ICP-MS با استفاده از NIST 1640 (انستیتو ملی استانداردها و تکنولوژی آمریکا) انجام شد (امیری و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج آنالیز پارامترهای فیزیکی (اندازه‌گیری شده در محل) و شیمیایی (در آزمایشگاه) به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. در جدول ۲، مقادیر پارامترهای شیمیایی بر حسب قسمت در میلیون (ppm) یا قسمت در میلیارد (ppb) است.

در این مطالعه از ICP-MS (Model-Quadrupole, High Performance, 4500) برای تعیین غلظت ایتريوم و برخی عناصر کمیاب خاکی (شامل Dy, Tb, Gd, Eu, Sm, Nd, Pr, Ce, La, Yb, Lu و Y) و کاتیون‌های Ca, Mg, Na و K، آنالیزور مجزا در آب بوسیله Aquakem DA برای آنیون‌های SO₄ و Cl (method ref. APHA 4500) و HCO₃ با تیتراسیون اسیدی (method ref. APHA 2320) استفاده شد.

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی و موقعیت نمونه‌های تهیه شده از محدوده سایت هیپ لیچینگ معدن سونگون

	UTM X	UTM Y	Elevation (m)	cm ⁻¹ EC (μS)	TDS (mg L ⁻¹)	pH	ORP (mV)	T (°C)
P1	646764	4279533	2417	278	139	7.43	-26.2	15.7
P2	647224	4279987	2471	252	126	7.65	-38.2	13.3
P3	646585	4280001	2448	652	326	7.95	-56.8	18.5
P4	646748	4280079	2451	348	174	8.94	-114.6	17.5

وضعیت فیزیکوشیمیایی نمونه‌های آبی

می‌دهند. تغییرات مقدار pH در این نمونه‌ها نشان می‌دهد که کمترین مقدار اسیدیته در نمونه P1 (۷/۴۳) و بیشترین مقدار در نمونه P4 (۸/۹۴) به ثبت رسیده است. به طور کلی، مقدار طبیعی pH در آب‌های سطحی می‌تواند بین ۶/۵ تا ۸/۵ باشد و این در حالی است که مقدار اسیدیته طبیعی برای آب‌های زیرزمینی بین ۶ تا ۸/۵ است. همانطوریکه مشاهده می‌شود، سه نمونه P1، P2 و P3 در دامنه مجاز برای هر دو نوع آب سطحی و زیرزمینی قرار دارند ولی نمونه P4 اندکی بالاتر از این محدوده قرار دارد و بر وجود کانی‌ها و ترکیبات قلیایی در محیط دلالت

بررسی نتایج اندازه‌گیری‌های فیزیکوشیمیایی نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین مقدار EC که به ترتیب برابر با ۲۵۲ و ۶۵۲ میکروزیمنس بر سانتیمتر (μS cm⁻¹) است در نمونه‌های P2 و P3 مشاهده می‌شود. نمونه P3 با بیشترین مقدار EC می‌تواند بر نرخ انحلال و برهم کنش بیشتر با محیط و همچنین زمان سیر طولانی مولکول‌های آب در محیط و یا زمان ماند بیشتر در محیط اشاره کند. نمونه‌های P1 و P2 نیز با کمترین مقدار EC می‌توانند نماینده‌ای تقریبی از ترکیب بارندگی بوده که خروج سریع و بدون واکنش زیاد بارش‌های صورت گرفته بر روی منطقه را نشان

دارد. عدم جریان داشتن آب، پراکنده بودن بر روی رسوباتی با منشأهای مختلف و در معرض تبخیر قرار گرفتن می‌تواند از جمله عوامل افزایش اسیدیته در این نمونه باشد. مقدار ORP یا Eh بیانگر میزان تمایل هر گونه شیمیایی جهت دریافت یا از دست دادن الکترون (احیا شدن یا اکسید شدن) می‌باشد. مقادیر پایین (منفی تر) ORP نشان‌دهنده تمایل بیشتر جهت از دست دادن الکترون و احیا شدن می‌باشد. بنابراین، در محیط‌هایی با میزان اکسیژن پایین انتظار می‌رود که مقدار Eh آب عبوری از میان خلل و فرج یا سیستم درز و شکافی کاهش یابد و به این طریق موجب کاهش مقدار Eh شود. مقدار Eh دو نمونه P1 و P2 تا حدودی بیشتر از دو نمونه P3 و P4 است و این بر میزان اکسیژن در دو نمونه اول و در نتیجه تازه بودن آن اشاره دارد. البته در همین مورد باید خاطر نشان کرد که مقدار Eh همچنان منفی است و این بر تأثیر میکروارگانیسم‌های غیرهوازی در محیط اشاره دارد. دامنه فعالیت میکروارگانیسم‌های غیرهوازی بین ۱۰۰+ تا ۲۵۰- میلی ولت می‌باشد (سان ۲۰۱۱).

بررسی مکانیسم‌های حاکم بر شیمی آب

بررسی نتایج آنالیزها نشان می‌دهد که نمونه‌های P1، P2 و P3 دارای تیپ شیمیایی بیکربنات کلسیم (CaHCO_3) بوده و به تعبیری اولیه بر تازه بودن آب دلالت دارد. نمونه P4 با تیپ شیمیایی بیکربنات سدیم (NaHCO_3) شرایط تبخیری را به خوبی و با تغلیظ مقدار سدیم نشان داده است. البته باید خاطر نشان کرد که این نمونه در معرض نور خورشید قرار داشته و نمی‌توان ترکیب آنرا با قطعیت به لایه‌های عمقی تعمیم داد. در این مطالعه، نمودار گیبس جهت بررسی دقیق‌تر فرآیندهای هیدروشیمیایی موثر در شیمی آب زیرزمینی همچون بارش، برهم‌کنش سنگ-آب و تبخیر مورد استفاده قرار گرفت. اگر مقدار مواد محلول (TDS) در مقابل $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ و $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$ رسم شود، اطلاعات مفیدی از مکانیسم حاکم بر شیمی آب بدست می‌آید. در این شکل‌ها، مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر

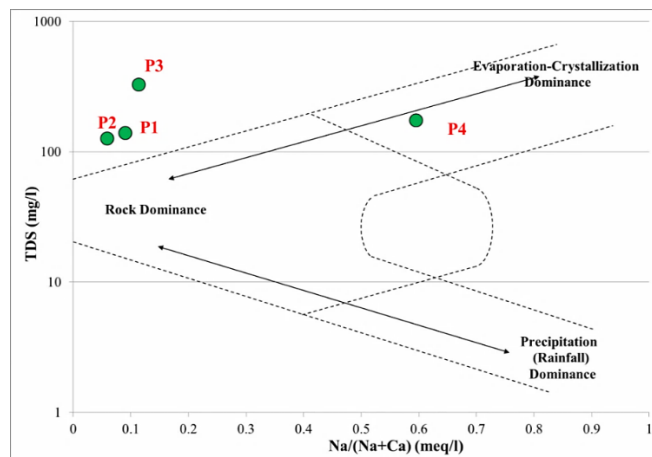
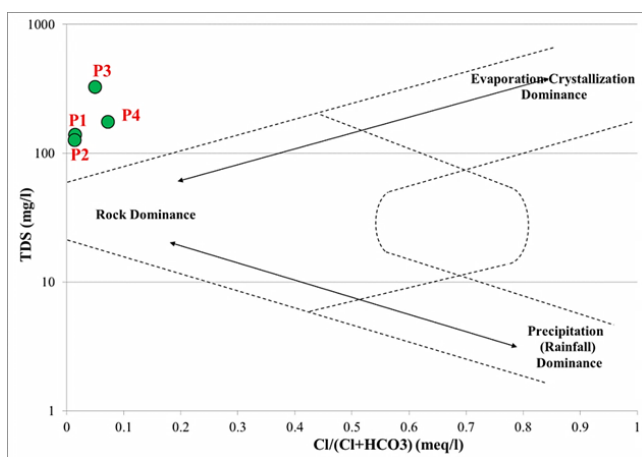
حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر (meq L^{-1}) می‌باشد. بررسی موقعیت نمونه‌های آبی تهیه شده از محدوده مورد مطالعه بر روی پلات گیبس (شکل ۴) نشان می‌دهد که در دیاگرام TDS در مقابل $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ ، سه نمونه P1، P2 و P3 در محدوده نزدیک به محدوده غالب بودن اثر واکنش با ساختارهای سنگی قرار گرفته است و بر تأثیر واکنش بین آب و مواد رسوبی و سنگی واقع در مسیر جریان دلالت دارد. همانطوری‌که در این شکل نشان داده شده است، نمونه P4 (نمونه تهیه شده در شمال و درون محدوده خاکبرداری شده) در فاصله بین غالب بودن اثر واکنش با ساختارهای سنگی و غالب بودن فرایند تبخیر واقع شده است و نشان دهنده تحت تأثیر بودن این نمونه توسط فرایند تبخیر می‌باشد. بررسی‌های میدانی نیز نشان می‌دهد که کاهش تدریجی وسعت محدوده مانداب موجود در محل می‌تواند عاملی برای شور شدن تقریبی توده آبی در این محل در مقایسه با سایر نمونه‌ها باشد. در نمونه‌های P1 تا P3 باید توجه شود که تمایل آن‌ها به مناطقی با مقدار TDS بالاتر از دامنه تغییرات محدوده غالب بودن واکنش با سنگ می‌تواند نشان دهد که عامل تغییر TDS و EC در این نمونه‌ها عواملی غیر از سدیم می‌باشد. در این زمینه می‌توان به نمونه P3 به عنوان شاخص‌ترین نمونه اشاره کرد. این نمونه دارای مقدار EC و TDS بیشتری در مقایسه با سایر نمونه‌های است و علیرغم این موضوع، دارای مقادیر کمتری Na (عامل حرکت نمونه به سمت محدوده تبخیر، مشابه نمونه P4) است. بنابراین، در یک نتیجه‌گیری اولیه و کلی می‌توان عامل افزایش مقدار TDS و همچنین EC در نمونه P3 به عنوان چشمه اصلی مورد نظر در این مطالعه را به عاملی غیر از تبخیر و تغلیظ شدن ناشی از آن نسبت داد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که آب تغذیه کننده این چشمه تأثیرپذیری کمی از تبخیر داشته و این خود می‌تواند بر نفوذ سریع آب بارندگی در محیط زیرسطحی و خروج از دسترس تبخیر و همچنین چرخش نسبتاً عمیق‌تر آب دلالت داشته باشد.

جدول ۲. پارامترهای هیدروشیمیایی نمونه‌های تهیه شده از سایت هیپ لیچینگ معدن سونگون

Element	HCO ₃	CO ₃	Cl	SO ₄	NO ₂	NO ₃	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb	ppm	ppb	ppb	ppb	ppb
DL*	0.2	0.4	0.3	0.3	0.001	0.01	0.05	0.01	0.1	1	0.2	0.1
P1	174	<	2.6	8	<	11.4	<0.05	<0.01	<0.1	32.36	<0.2	<0.1
P2	131	<	1.9	9.3	<	2.3	<0.05	<0.01	<0.1	173.19	<0.2	<0.1
P3	351	<	18.5	15.3	<	<	<0.05	0.77	0.88	737.27	<0.2	<0.1
P4	173	<	13.6	23.1	<	<	<0.05	<0.01	2.1	247.18	<0.2	<0.1
Element	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Eu	Fe	Gd	In
Unit	ppm	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppm	ppb	ppb
DL	0.01	0.1	0.1	1	1	0.1	1	0.1	0.1	0.01	0.1	0.5
P1	51.9	0.53	0.25	<1	<1	1.04	1.13	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1	<0.5
P2	55.3	0.34	0.61	<1	<1	0.28	<1	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1	<0.5
P3	104.6	0.5	4.16	2.17	3.12	0.12	7.67	0.37	0.33	0.52	0.47	<0.5
P4	20.1	0.21	0.18	<1	<1	0.1	3.1	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1	<0.5
Element	K	La	Li	Lu	Mg	Mn	Mo	Na	Nb	Nd	Ni	P
Unit	ppm	ppb	ppb	ppb	ppm	ppm	ppb	ppm	ppb	ppb	ppb	ppm
DL	0.01	0.5	1	0.1	0.01	0.01	0.1	0.01	0.1	0.5	0.1	0.01
P1	4.98	<0.5	1.22	<0.1	7.2	<0.01	0.81	5.94	<0.1	<0.5	1.38	0.23
P2	9.34	0.7	<1	<0.1	6.49	<0.01	0.56	4.01	<0.1	0.5	0.68	0.08
P3	8.35	2.54	1.52	<0.1	19.64	1.6	1.94	15.45	0.13	2.26	8.41	0.21
P4	2.5	<0.5	1.6	<0.1	25.17	<0.01	9.12	33.97	0.1	<0.5	0.11	0.09
Element	Pb	Pr	Rb	S	Sb	Sc	Se	Si	Sm	Sn	Sr	Ta
Unit	ppb	ppb	ppb	ppm	ppb	ppb	ppb	ppm	ppb	ppb	ppb	ppb
DL	1	0.1	1	0.05	0.1	1	0.1	0.01	0.1	0.1	1	0.1
P1	1.15	<0.1	1.24	5.5	<0.1	3.62	0.79	5.66	<0.1	0.11	345.22	<0.1
P2	<1	0.12	<1	6.09	<0.1	2.26	0.17	4.68	0.14	<0.1	355.81	<0.1
P3	<1	0.59	2.07	9.53	<0.1	5.39	0.27	9.87	0.75	0.11	872.79	<0.1
P4	<1	<0.1	<1	15.09	<0.1	<1	0.4	0.35	0.11	0.27	657.95	<0.1
Element	Tb	Te	Th	Ti	Tl	U	V	W	Y	Yb	Zn	
Unit	ppb	ppb	ppb	ppm	ppb	ppb	ppb	ppb	ppm	ppb	ppb	
DL	0.1	0.1	0.1	0.01	0.1	1	1	1	0.01	0.1	0.1	
P1	0.13	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1	<1	0.99	<1	<0.01	<0.1	11.31	
P2	0.14	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1	1.11	0.77	<1	<0.01	<0.1	5.05	
P3	0.21	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1	10.53	8.36	<1	<0.01	0.23	9.37	
P4	0.13	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1	8.31	1.41	<1	<0.01	<0.1	22.55	

*DL: حد تشخیص^{۶۱}

⁶¹ detection limit

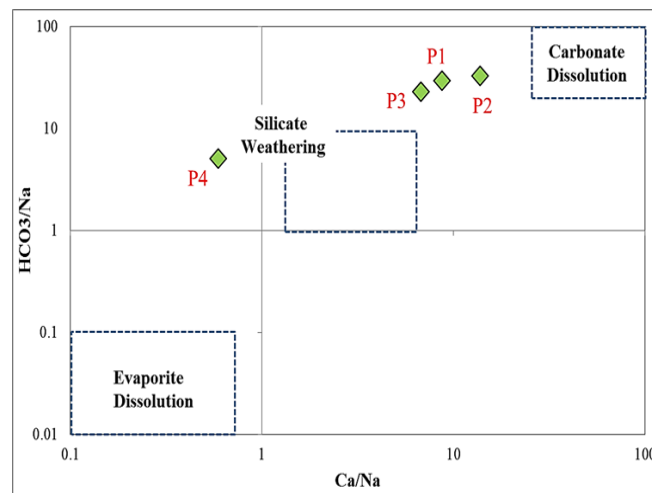
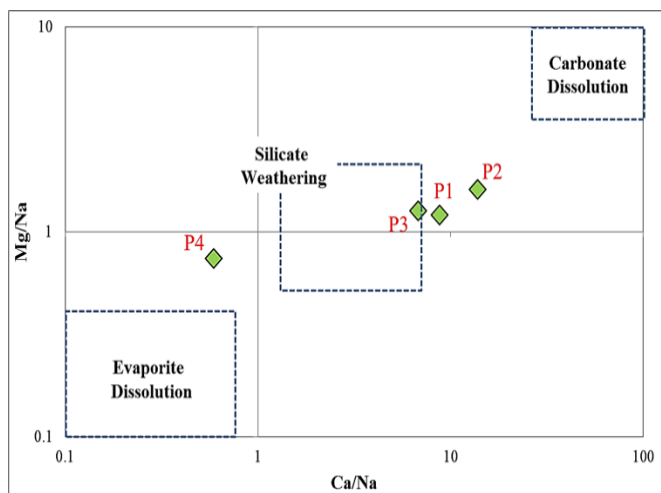


شکل ۴. مکانیسم‌های کنترل کننده غالب شیمی آب در منطقه مورد مطالعه (بر اساس نمونه برداری محدود) بر اساس تغییرات TDS در مقابل $Na/(Na+Ca)$ (سمت راست) و TDS در مقابل $Cl/Cl+HCO_3$ (سمت چپ)

حاوی کربنات، هوازگی سیلیکات‌ها و انحلال کانی‌های تبخیری است. موقعیت نمونه‌های تهیه شده از محدوده مورد مطالعه بر روی شکل ۵ نشان داده شده است. مشابه پراکندگی نمایش داده شده بر روی پلات گیبس، نمونه P4 دارای ترکیبی بین دو محدوده هوازگی سیلیکات‌ها و متمایل به محدوده انحلال ترکیبات تبخیری می‌باشد. ترکیب دوگانه این نمونه بر تأثیر مشترک برهم کنش آب با ساختارهای سنگی هوازده و در مرحله پس از آن بر تأثیر تبخیر حکایت دارد. نمونه‌های P1 تا P3 نیز بین دو محدوده انحلال کانی‌ها و سنگ‌های کربناته و هوازگی سیلیکات‌ها قرار گرفته‌اند.

تکامل ژئوشیمیایی آب زیرزمینی به میزان زیادی توسط انحلال کانی‌های کربناته، هوازگی سیلیکات‌ها و فرایندهای تبادل یونی با مواد تشکیل شده آبخوان کنترل می‌شود (بسیواز و همکاران، ۲۰۱۲). سهم نسبی هر یک از این فرایندها در تکامل ترکیب شیمیایی آب بیشتر تابعی از ترکیب کانی‌شناسی رسوبات موجود در آبخوان و همین‌طور سینتیک فرایند هوازگی شیمیایی است (فور، ۱۹۹۸).

علاوه بر دیاگرام گیبس، در این مطالعه از دیاگرام‌های دوگانه ارائه شده توسط بسیواز و همکاران (۲۰۱۲) نیز استفاده شده است. این دیاگرام دارای سه بخش کلی شامل انحلال ترکیبات



شکل ۵. مهم‌ترین مکانیسم‌های کنترل کننده ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی در نمونه‌های تهیه شده از محدوده سایت هیپ لیچینگ معدن سونگون (غلظت‌ها بر حسب ppm هستند).

تمایل نمونه‌های P1 و P2 بر وجود ترکیبات کربناته بیشتری در مسیر جریان در مقایسه با دو نمونه P3 و P1 اشاره دارد. نفوذ آب و حرکت آرام آب در قشر هوازده، رسوبی و غیرمترکم رویی می‌تواند فرصت بیشتری برای انحلال برخی کانی‌های کربناته در اختیار قرار دهد. البته باید در این مورد خاطر نشان کرد که وجود ترکیب کربناته در آب با وجود تمایل و همچنین پتانسیل انحلال توسط یک نمونه آب متفاوت است و تحت شرایط مختلف محیطی می‌تواند تفاسیر گوناگونی داشته باشد. این وضعیت و تغییرات ضرایب اشباع کانی‌های مختلف در بخش مدل‌سازی معکوس ژئوشیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است. پراکندگی نمونه‌های آبی بر روی دیاگرام بیسوز و همکاران (شکل ۵) نشان می‌دهد که نمونه P3 در نزدیک‌ترین فاصله از محدوده هوازدهگی سیلیکات‌ها قرار دارد. وجود ساختارهای سیلیکاته در این محدوده و عدم بالا بودن نرخ تبخیر و همچنین مقدار کم نسبت $Na/(Na+Ca)$ (به پلات گیبس توجه شود) علیرغم مقدار TDS بیشتر آن نشان می‌دهد که برهم کنش آب به ساختارهای سنگی و بیشتر سیلیکاته موجود در مسیر انتقال می‌تواند مهم‌ترین تأثیر را بر تغییر ترکیب شیمیایی آن داشته باشد. بنابراین، با توجه به وضعیت موجود و قرارگیری ترکیب شیمیایی نمونه مورد نظر در بین دو محدوده انحلال کربنات‌ها و هوازدهگی سیلیکات‌ها، مسیر جریان آب می‌تواند از بین ساختارهای سنگی با این ترکیبات عبور کرده باشد. از طرفی دیگر، تمایل بیشتر نمونه P3 به محدوده هوازدهگی سیلیکات‌ها در مقایسه با محدوده انحلال کربنات‌ها نیز نشان می‌دهد که تأثیر محدوده سیلیکاته و کریستالی (البته هوازده یا بسیار خرد شده) بیشتر از تأثیر انحلال ترکیبات کربناته موجود در مسیر جریان است.

به عبارتی دیگر، زمان عبور آب از میان ساختارهای کربناته و همچنین زمان ماند آب در اینگونه ترکیبات کمتر از ساختارهای با ترکیب غالب سیلیکاته است. به عبارتی دیگر، طول مسیر جریان آب زیرزمینی از میان بخش سیلیکاته و همچنین زمان واکنش آب با اینگونه ترکیبات بیشتر از کانی‌های کربناته می‌باشد.

مدل‌سازی ژئوشیمیایی معکوس

در مطالعه حاضر، مدل‌سازی گونه‌زایی ژئوشیمیایی که شامل اندیس‌های اشباع‌شدگی (SI) کانی‌ها است با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC (پارخورست و آپلو ۱۹۹۹) انجام شد. تعیین گونه‌زایی و وضعیت اشباع‌شدگی گونه‌های مختلف در نمونه‌های آب زیرزمینی (در اینجا چشمه) جهت ارزیابی مسیر احتمالی عبور آب از میان ساختارهای سنگی ضروری است.

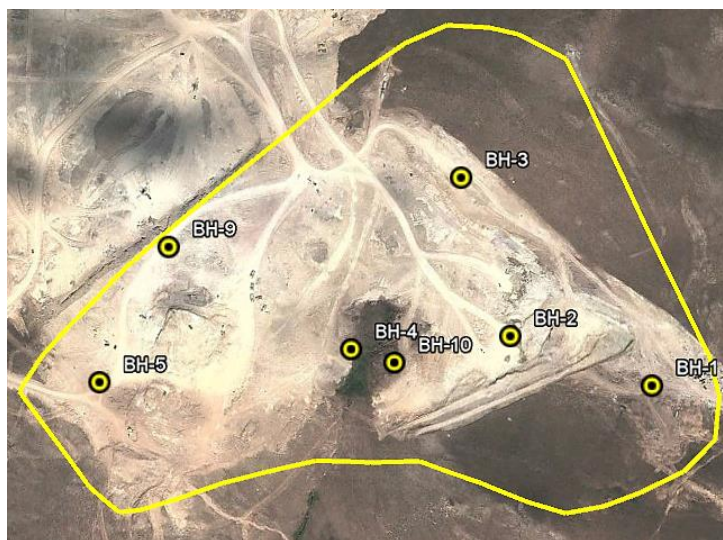
به منظور بررسی اندیس اشباع‌شدگی نمونه‌های آبی تهیه شده، از یک دسته داده شامل مقادیر متوسط ۲۴ متغیر (pH, Eh, HCO_3 , SO_4 , Cl, NO_3 , Ca, K, Mg, Na, Ba, Fe, Li, Mn, Si, U, Cu, As, Al, Ni, Pb و Zn) استفاده شده است. عناصری که دارای مقادیر کمتر از حد تشخیص دستگاه آنالیزور بوده‌اند با کمترین مقدار قابل تشخیص تقسیم بر رادیکال ۲ ($L/\sqrt{2}$) جایگزین شده است (فینکلستان و ورما، ۲۰۰۱؛ سوکوپ، ۲۰۰۴). اندیس اشباع ($SI = \log(IAP/KT)$) که در آن IAP محصول فعالیت یونی کانی و KT ثابت‌های تعادل (وابسته به دما) است؛ محاسبه شد. در این مطالعه، حالت تعادل زمانی است که SI بین ۰/۵- و ۰/۵+ باشد. این اندیس برای ارزیابی نرخ اشباع‌شدگی آب زیرزمینی نسبت به فازهای مختلفی همچون رسوبگذاری و یا انحلال در نمونه‌های آب زیرزمینی استفاده می‌شود (بوزورا و همکاران ۲۰۱۴). اگر اندیس اشباع یک کانی کمتر از صفر باشد، آب نسبت به آن کانی تحت‌اشباع می‌شود. این بدان معناست که آن کانی نمی‌تواند رسوب کند و باید در این محلول حل شود که به این طریق غلظت‌ها به تعادل (نرخ رسوبگذاری برابر با نرخ انحلال) برسد. در یک آبخوان که زمان ماند آب زیرزمینی در آن چندین سال تا چندین دهه و بیشتر است، احتمال اینکه یک کانی واکنشی و فعال در آب به صورت غیراشباع باقی بماند؛ کم است. محتمل‌ترین تفسیر برای حالتی که SI یک کانی کمتر از صفر باشد این است که کانی مورد نظر در صورتی که واکنشی است، در محیط وجود ندارد و یا اینکه اگر در محیط وجود دارد، واکنشی نیست (دوچ و سیگل، ۱۹۹۷).

بررسی مقادیر SI (اطلاعات کامل در جدول تکمیلی ۱) نشان می‌دهد که همه نمونه‌های آبی مورد نظر نسبت به گونه‌های آهن‌دار اصلی مانند هماتیت (Fe_2O_3)، مگهمیت (Fe_2O_3).

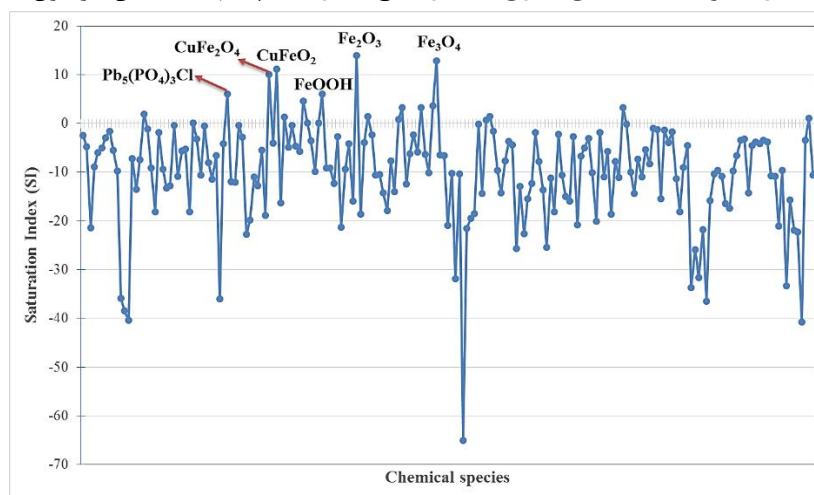
۱۹۹۶، اسکات و همکاران، ۲۰۰۵). مگمیت در نتیجه هوازدگی یا اکسیداسیون اسپینل‌های حاوی آهن (Fe^{2+}) مانند مگنتیت یا تیتانومگنتیت در دمای پایین تشکیل می‌شود. بررسی گمانه‌های حفاری شده در محدوده سایت هیپ لیچینگ معدن سونگون (شکل ۶) نشان می‌دهد که غالب‌ترین ساختار سنگی این منطقه به صورت کلی شامل تشکیلات گرانودیوریتی تشکیل شده از کانی‌های پلاژیوکلاز، آمفیبول، پیروکسن و کوارتز می‌باشد. بنابراین وجود ترکیبات آهن‌دار، سدیم‌دار و پتاسیم‌دار و آلومینیوم‌دار در آب‌های این نواحی امری طبیعی می‌باشد. از طرفی نیز با توجه به اینکه آب موجود در شبکه درز و شکافدار منطقه دارای بیشترین سطح تماس با اینگونه تشکیلات سنگی است، انتظار می‌رود که نرخ انحلال این کانی‌ها در زمان ورود آب‌های تازه بیشتر از سایر کانی‌ها بوده و به مرور با توجه به حضور انحصاری اینگونه کانی‌ها در محیط، آب‌های موجود در بین شکستگی‌ها نسبت به کانی‌های مزبور و عناصر موجود در آن‌ها به حالت تعادل و پس از آن فوق‌اشباع (پتانسیل رسوبگذاری) سوق پیدا کنند. در شکل‌های ۷ تا ۱۰، مقادیر SI در نمونه‌های تهیه شده از نقاط P1 تا P4 نمایش داده شده است. وجود ترکیبات آهن‌دار در کنار ترکیبات حاوی مس و همین‌طور پوشیده شدن سطح درز و شکاف‌ها توسط ترکیبات کربناته و آهن‌دار (بر اساس گمانه BH-2 در محل نمونه‌برداری P4 و گمانه BH-4 در محل نمونه‌برداری P3) نشان می‌دهد که توان انحلال این کانی‌ها توسط آب‌های عمقی بالا بوده و با گذشت زمان و با توجه به افزایش غلظت این کانی‌ها در آب، محلول آبی به صورت فوق‌اشباع با مقدار SI بیشتر (مقادیر مثبت بیشتر) مشاهده خواهد شد. وضعیت توصیف شده در این مورد را می‌توان در شکل ۹ برای نمونه P3 و شکل ۱۰ برای نمونه P4 مشاهده کرد. در این مورد می‌توان به وجود ترکیبات فوق‌اشباع حاوی کلسیم ($Ca_2Al_4Si_8O_{24} \cdot 2H_2O$) در نمونه P3 توجه کرد که می‌تواند بر امکان عبور و همچنین ماندگاری بالای آب در محیط‌های حاوی کلسیم اشاره کند. در این خصوص می‌توان به بررسی منشأ آب ورودی به محل چشمه P3 بر همین اساس اشاره کرد.

مگنتیت (Fe_3O_4) و گوتیت ($FeOOH$) فوق‌اشباع هستند. هماتیت یک کانی اولیه بوده و از طرف دیگر نیز به عنوان محصول دگرسانی سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی شناخته می‌شود. هماتیت با واکنش محلول‌های آبی حاوی آهن فروس (Fe^{2+}) (هیدروترمال یا آب زیرزمینی)، کانی‌ها (مانند سیدریت ($FeCO_3$)، پیریت (FeS_2) و اولیوین ($FeSiO_4$)) و یا سنگ‌های محتوی آب غنی از اکسیژن تشکیل می‌شود (کاتو همکاران، ۲۰۰۹). چنانچه مقدار SI یک کانی بیشتر از صفر باشد، آن کانی واکنشی نیست. اگر یک کانی واکنشی باشد، غلظت محلول مواد تشکیل شده خود را در مقادیری که موجب شود مقدار SI نزدیک به صفر باقی بماند؛ محدود می‌کند. هماتیت مثال خوبی از این شرایط است. هماتیت از نظر ترمودینامیکی یکی از پایدارترین اشکال Fe^{3+} است و به همین دلیل تمایل دارد مقدار غلظت یون محلول آن در حد پایینی باقی بماند. بنابراین، معمولاً آب‌های اکسید کننده در تعادل با هماتیت قرار ندارند. در واقع، اندیس‌های اشباع برای هماتیت بیشتر از ۱۰ است که بیانگر حالتی فوق‌اشباع نسبت به این کانی است. سرعت رسوبگذاری هماتیت حتی در شرایطی که آب زیرزمینی دارای زمان ماند بالایی است، آنقدر زیاد نیست که قادر به کنترل غلظت یون آهن محلول باشد. بنابراین، با توجه به محدود کردن غلظت یون محلول، هماتیت یک کانی واکنشی و فعال محسوب نمی‌شود (دوچ و سیگل، ۱۹۹۷). مگنتیت یک کانی از سه اکسید رایج آهن است که به صورت طبیعی تشکیل می‌شود. این کانی بیشتر در محیط‌های غیرهوازی زیرسطحی همچون آبخوان‌ها یافت می‌شود. اوتاک و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که تبدیل مگنتیت به هماتیت و بالعکس به راحتی و از طریق واکنش‌های غیرریداکس (اکسایش-کاهش) حتی در دمای اتاق قابل انجام است (اوتاک و همکاران، ۲۰۰۷).

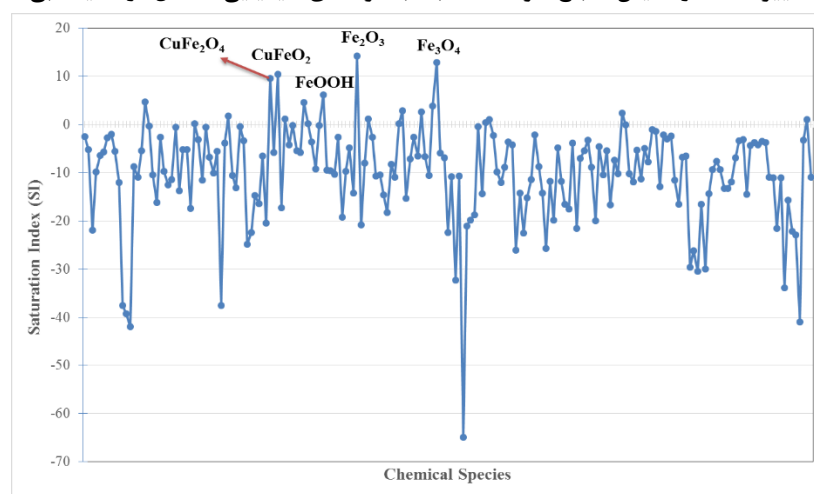
در محیط‌های طبیعی، مگنتیت یک محصول نهایی و مرسوم از کاهش بیولوژیکی و غیرهوازی اکسیدهای فریک (Fe^{3+}) و یک تسهیل‌کننده واکنش‌های احیایی بسیاری از آلاندهای زیست‌محیطی موجود در آب زیرزمینی است (وایت و پترسون،



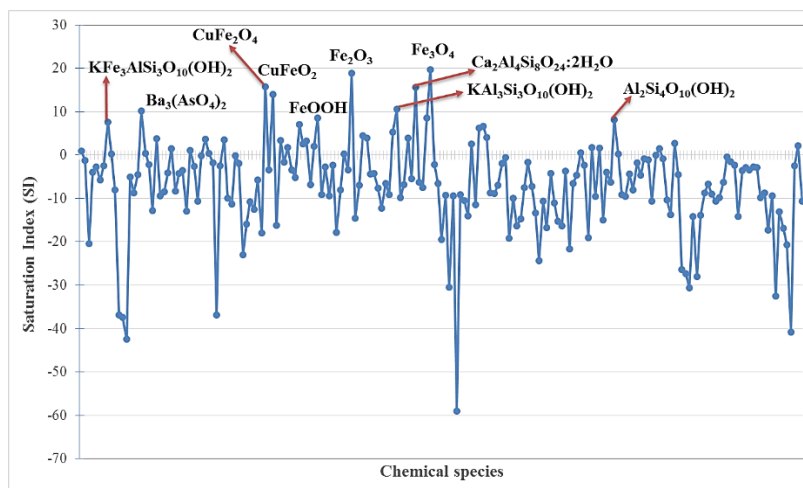
شکل ۶. موقعیت گمانه‌های حفاری شده در سطح محدوده هپ لیچینگ معدن سونگون



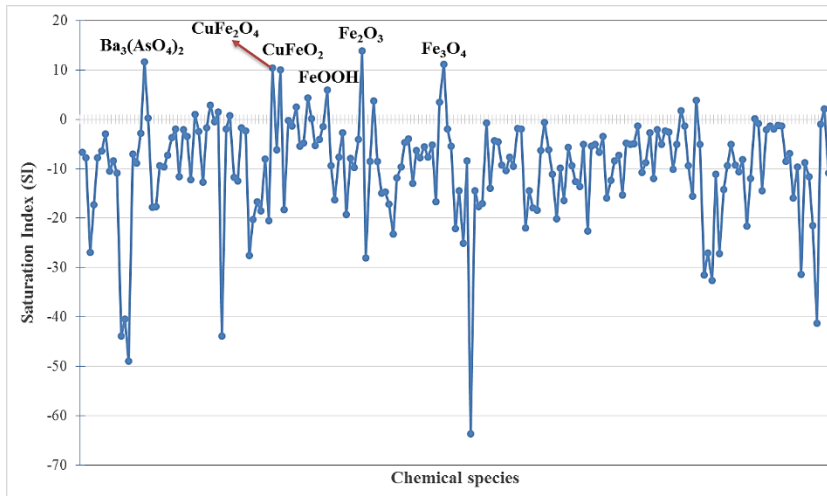
شکل ۷. تغییرات مقدار اندیس اشباع نمونه P1 نسبت به گونه‌های شیمیایی محتمل در محیط آبی - سنگی



شکل ۸. تغییرات مقدار اندیس اشباع نمونه P2 نسبت به گونه‌های شیمیایی محتمل در محیط آبی - سنگی



شکل ۹. تغییرات مقدار اندیس اشباع نمونه P3 نسبت به گونه‌های شیمیایی محتمل در محیط آبی - سنگی

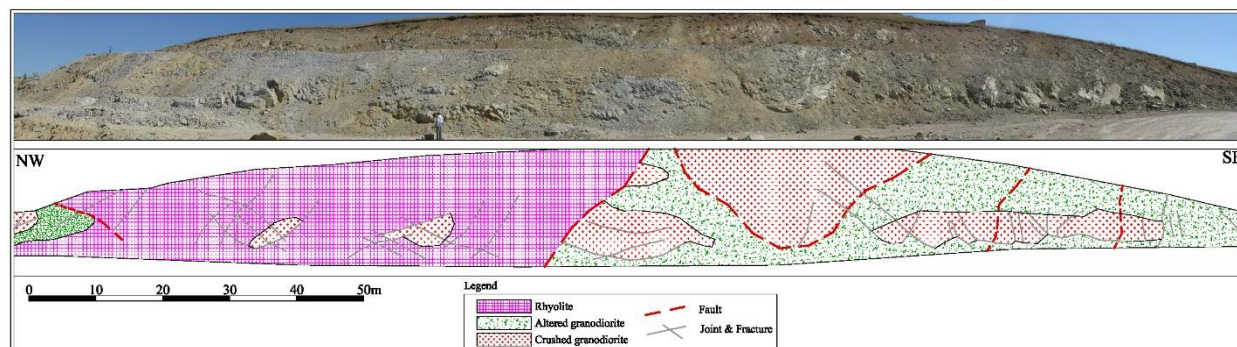


شکل ۱۰. تغییرات مقدار اندیس اشباع نمونه P4 نسبت به گونه‌های شیمیایی محتمل در محیط آبی - سنگی

اندیس‌های اشباع محاسبه شده نشان می‌دهد که نمونه‌های P3 و P4 نسبت به برخی فازهای کربناته همچون دولومیت و کلسیت تقریباً نزدیک به حالت تعادل تا حدودی اشباع هستند که این بیانگر احتمال رسوبگذاری کربنات‌ها در آب‌های این منطقه است. بنابراین، حتی در صورتیکه ترکیبات کلسیم‌دار در این منطقه وجود داشته باشد، امکان انحلال بیشتر ترکیبات کربناته در این نمونه‌ها وجود ندارد. یک دلیل محتمل برای این مورد می‌تواند زمان ماند بیشتر آب موجود در این مناطق و اشباع شدن آن نسبت به ترکیبات کربناته باشد. به عبارتی دیگر، پتانسیل انحلال این نمونه‌ها به اتمام رسیده است و امکان رسوبگذاری کانی‌های کربناته می‌تواند وجود داشته باشد. البته باید توجه داشت که مکانیسم و ترمودینامیک سیستم‌های کربناته در آب‌های زیرزمینی چندان از قوانین حاکم بر سایر کانی‌ها و محدوده‌های تعریف شده SI برای تعادل، انحلال و یا رسوبگذاری تبعیت نمی‌کند. همان طوری که پیش از این عنوان شد، ساختارهای گرانودیوریتی و دیوریتی که عمدتاً دگرسان شده اند به عنوان مهمترین تشکیلات دربرگیرنده مواد معدنی شناخته می‌شوند. در شکل ۱۱ مقطعی از یک ترانشه (ترانشه Tr8، به عنوان مثال) واقع در شرق محدوده سایت هیپ لیچینگ نمایش داده شده است. از طرفی دیگر بررسی ساختار زمین‌شناسی و امتداد تشکیلات سنگی در محدوده سایت مورد نظر نشان می‌دهد که یک زون فیلیکی دارای رگه‌های آغشته به اکسید منگنز از سمت جنوب و با امتداد جنوب شرقی - شمال غربی از محل چشمه P3 عبور کرده است. بر همین اساس، مدل‌سازی ژئوشیمیایی

معکوس جهت تعیین پتانسیل انحلال و یا رسوبگذاری گونه‌های محتمل منگنزدار در نمونه آبی تهیه شده از این منطقه مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه اجرای مدل معکوس نشان می‌دهد که با توجه به ترکیب شیمیایی نمونه P3، مقدار ضریب اشباع‌شدگی در ۱۱ گونه محتمل حاوی منگنز قابل تعیین است.



شکل ۱۱. وضعیت کلی زمین شناسی در مسیر ترانشه Tr8 (به عنوان مثال) واقع در غرب محدوده سایت هیپ لیچینگ. موقعیت ترانشه در شکل ۱ نمایش داده شده است (برگرفته از شرکت زمین، آب، پی ۱۳۹۵).

است. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود برخی جریان‌ات محدود آبی (با توجه به دبی بسیار کم چشمه) نشأت گرفته از مناطق جنوبی شرقی و در تماس با این تشکیلات منگنزدار می‌تواند در تأمین آب این چشمه نقش داشته باشد.

بررسی دینامیک جریان آب در محیط

بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در سایت مورد مطالعه با استفاده از مقدار عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی در تعداد ۱۰ گمانه حفر شده در محدوده مطالعاتی (تعداد ۷ مورد از این گمانه‌ها در سایت هیپ لیچینگ واقع شده است) در دو بازه زمانی با فاصله ۳۵ روز از هم انجام شده است. موقعیت گمانه‌های مزبور در شکل ۶ و اطلاعات مربوط به این گمانه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. همانطوریکه نشان داده شده است، عمق گمانه‌ها از ۱۰ تا ۵۰ متر در تغییر است و عمق حفاری گمانه‌های موجود در محدوده سایت هیپ لیچینگ نیز در دامنه ۱۸ تا ۵۰ متر قرار می‌گیرند. بررسی نوسان تراز آب در بازه زمانی مورد نظر نشان می‌دهد که در محدوده تقریباً محدود سایت مورد، نوسانات فاحش تراز آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. در اولین نوبت اندازه‌گیری سطح آب، به استثنای گمانه BH-5 که بدون آب و خشک بوده است، اختلاف بین عمیق‌ترین و کم عمق‌ترین سطح آب مشاهده شده در حدود ۱۴/۸ متر بوده است. به همین ترتیب، در دومین دور از اندازه‌گیری‌ها مشخص شد که این اختلاف به ۱۴/۹ متر رسیده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که به استثنای نمونه P3 که دارای مقدار SI مثبت (۲/۵) نسبت به ترکیب $MnHPO_4$ است، سایر نمونه‌ها دارای مقادیر منفی SI برای تمامی ۱۱ گونه منگنزدار مورد بحث می‌باشند. همانطوری که پیش از این ذکر شد، مقادیر منفی SI بر عدم وجود یک ترکیب در محیط و یا نرخ بسیار پایین انحلال آن دلالت دارد. از آنجائیکه منطقه مورد نظر دارای برخی رگه‌های منگنزدار اثبات شده است، لذا فرض اول (عدم وجود ترکیب منگنزدار در محیط) رد شده و مقادیر منفی SI را می‌توان به مورد دوم (نرخ بسیار پایین انحلال ترکیبات منگنزدار) نسبت داد. بررسی مقدار SI مثبت در نمونه P3 نسبت به ترکیب منگنزدار $MnHPO_4$ می‌تواند بر عبور مستمر آب از مجاری و مسیرهای حاوی این ترکیب و در نتیجه بالا بردن نرخ انحلال آن به مرور زمان (تجمع آرام این ترکیب در آب موجود در فضای درز و شکافدار) و اشباع شدن آب نسبت به این ترکیب دلالت داشته باشد. بنابراین، انتظار می‌رود آب چشمه مورد نظر با فرایند رسوبگذاری این ترکیب در محل خروجی آب مواجه باشد که این مورد به بررسی ترکیب کانی‌شناسی رسوبات تشکیل شده در این منطقه نیاز دارد. همانطوری که پیش از این ذکر شد، امتداد یک گسل مدفون در راستای جنوب شرقی - شمال غربی و در محل برونزد چشمه P3 توسط مشاهدات صحرایی و برداشت‌های ژئوفیزیکی تقریباً قطعی به نظر می‌رسد. از طرفی دیگر، برخی حفرات پر شده از اکسید منگنز در این امتداد شناسایی شده

آب در گمانه BH-9 است. این گمانه با فاصله بسیار کم (کمتر از ۵ متر) از دیواره ترانشه واقع در بخش غربی خود، سطح آبی در عمق ۵/۸ تا ۶/۲۵ متری از سطح زمین را نشان می‌دهد. بررسی و بازدید صحرایی از دیواره ترانشه در راستای گمانه مزبور نشان می‌دهد که هیچگونه اثری از نشت آب در آن مشاهده نمی‌شود. ورود آب از شکستگی‌هایی با بازشدگی‌های مختلف که موجب تجمع آب در محل گمانه BH-9 شده‌اند و محیطی بدون درز و شکاف (بکر) که موجب ایزوله شدن محیط اشباع اطراف چاه از بخش‌های غربی گمانه مزبور شده‌اند، محیطی با انیزوتروپی و ناهمگنی بسیار بالا را نشان می‌دهد. در اینگونه مواقع، تعیین تراز آب زیرزمینی با روش‌های درون‌یابی معمول نادرست بوده و منجر به خطای بیشتر در تفاسیر بعدی می‌شود. به همین دلیل در مطالعه حاضر از ترسیم خطوط هم تراز آب زیرزمینی اجتناب شده است و به بررسی نقطه به نقطه سطح آب در گمانه‌های موجود اکتفا شده است.

بررسی اختلاف تراز آب زیرزمینی در هر گمانه برای دو بازه زمانی با فاصله ۳۵ روز نشان می‌دهد که به استثنای گمانه BH-5 (عدم برخورد به سطح آب) و گمانه BH-6 (خارج از محدوده)، تمامی گمانه‌ها با کاهش تراز مواجه شده‌اند. کمترین مقدار افت (به مقدار ۰/۲ متر) در گمانه BH-2 و بیشترین مقدار افت (به مقدار ۲/۸۳ متر) در گمانه BH-1 رخ داده است. در محیط‌های تشکیل شده از سازندهای سخت و درز و شکافدار، انیزوتروپی و هتروژنی بالای محیط و عدم امکان تعیین مسیر و عمق درزه‌های ریز و متوسط موجب می‌شود که تعیین مجرای عبور آب و عمق نفوذ آن نیز همراه با عدم قطعیت بالایی باشد. این مورد را می‌توان در گمانه‌های مورد بحث به وضوح مشاهده کرد. همان طوری که مشاهده می‌شود، گمانه BH-5 علیرغم عمق بالاتر در مقایسه با برخی گمانه‌های کم عمق، هیچگونه اثری از برخورد به سطح آب را نشان نمی‌دهد. در این گمانه، عدم برخورد به سطح آب نشان از حفاری آن در محیطی بکر و به تعبیری بدون درز و شکاف شاخص دارد. نکته قابل توجه در همین زمینه نیز تغییرات تراز

جدول ۳. تغییرات سطح آب در گمانه‌های حفاری شده در محدوده مطالعاتی و اطراف آن

تغییر در بازه ۳۵ روزه	سطح آب (m)		عمق گمانه (m)	موجود در سایت لیچینگ	UTM X	UTM Y	گمانه
	چهاردهم مهر ماه ۹۵	دهم شهریور ماه ۹۵					
-2.83	7.48	4.65	30	*	646894	4279980	BH-1
-0.2	0.7	0.5	50	*	646744	4280030	BH-2
-0.3	15.6	15.3	18	*	646689	4280196	BH-3
-0.4	2	1.6	30	*	646575	4280013	BH-4
0	0	0	20	*	646308	4279944	BH-5
1.9	4.5	6.4	10	-	-	-	BH-6
-0.5	2	1.5	10	-	-	-	BH-7
-0.45	2	1.55	10	-	-	-	BH-8
-0.45	6.25	5.8	30	*	646380	4280118	BH-9
-0.25	1.75	1.5	27	*	646621	4279999	BH-10

مقابل، در گمانه BH-2 که در محدوده خاکبرداری شده سایت هیپ لیچینگ واقع شده است، عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی در مقاطع زمانی مشترک به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۵ متر می‌باشد. با یک نگاه کلی به این بخش از منطقه می‌توان دریافت که تراز کلی آب در این بخش تابعی از توپوگرافی منطقه

بررسی سطح آب زیرزمینی در گمانه‌های BH-1، BH-2 و BH-3 تا حدودی می‌تواند به یک نتیجه‌گیری کلی در رابطه با این گمانه‌ها ختم شود. همانطوریکه در جدول ۳ نشان داده شده است، در گمانه BH-3 با عمق ۱۸ متر، سطح آب در دو مقطع زمانی در عمق ۱۵/۳ و ۱۵/۶ متری از سطح زمین قرار دارد. در

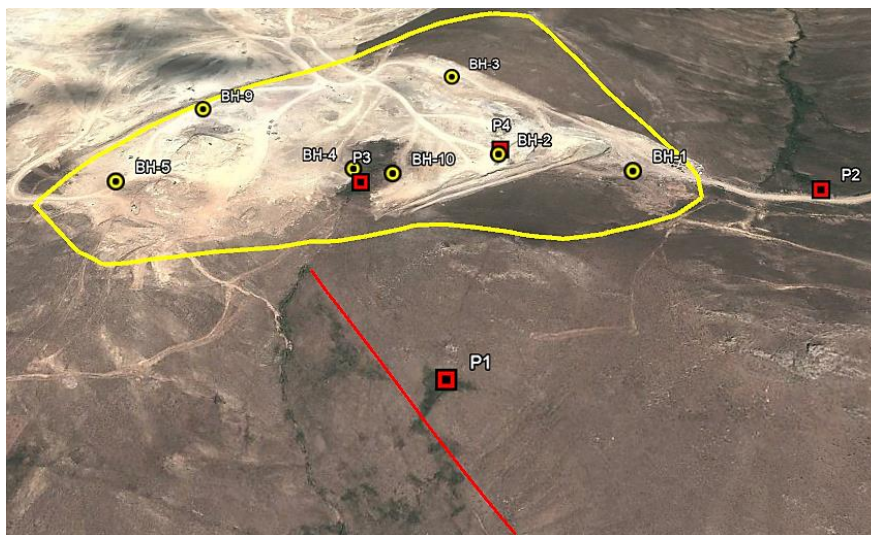
بوده است و با برداشته شدن پوشش هوازده رویی در سایت مورد مطالعه، سطح آب زیرزمینی نمایان شده است. از آنجائیکه تغییر و نوسان زیادی در بخش خاکبرداری شده (در محل گمانه BH-2) مشاهده نمی‌شود، به نظر می‌رسد نفوذ آب (هر چند با سرعت بسیار کم) از بخش‌ها و ارتفاعات بالایی تنها منبع تأمین کننده آب در این منطقه می‌باشد و نشت بسیار کند آب موجب کاهش ناچیز تراز آب در این منطقه می‌شود. به تعبیری دیگر، به نظر می‌رسد سرعت آب از بخش‌های بسیار خرد شده گسلی مشاهده شده در شمال شرقی و شرق BH-2 معبری برای جریان به این بخش است و گمان می‌رود که جریان آب به سمت مناطق پایین دست با سرعتی بسیار کمتر از نفوذ آب از بخش‌های بالایی صورت می‌گیرد. این وضعیت را می‌توان به بسته شدن مجاری و شکستگی‌ها به هر دلیلی مانند تراکم و پر شدن با مواد ریز دانه، تأثیر جابجایی ماشین آلات حین عملیات خاکبرداری، بکر بودن ذاتی سنگ‌ها و مواردی اینچنینی نسبت داد. با توجه به آنچه در این بخش ذکر شد، به نظر می‌رسد تراز تقریبی آب زیرزمینی را بین دو گمانه BH-2، BH-3 و همچنین تا حدودی BH-1 را می‌توان به بخش‌های محدود اطراف آن‌ها تعمیم داد. بررسی سیستم جریان در چشمه اصلی برونزد پیدا کرده در این منطقه (P3، به بخش هیدروژئوشیمیایی توجه شود) با کمک تراز آب در دو گمانه حفاری شده در بخش شرقی و غربی آن انجام شده است. سطح آب در گمانه BH-10 با عمق حفاری ۲۷ متر و گمانه BH-4 با عمق حفاری ۳۰ متر نشان می‌دهد که عمق تقریبی آب در محدوده اطراف چشمه در ۱/۵ تا ۲ متری سطح زمین قرار دارد. با توجه به اینکه این منطقه در پایین دست ارتفاعات شمالی و شرقی قرار دارد و با تصور توپوگرافی اولیه این منطقه، به صورت کلی انتظار می‌رود که جهت کلی جریان و نهایتاً خروج آب از منطقه از محل چشمه فعلی P3 رخ دهد. علاوه بر عامل اختلاف ارتفاع ناشی از توپوگرافی که موجب اختلاف در بار هیدرولیکی و در نتیجه جریان آب به مناطقی با بار کمتر (محل خروج آب در محل چشمه) می‌شود، عوامل دیگری مانند شکستگی‌ها (در این مورد گسل شناسایی شده با راستای تقریبی شمال شرقی - جنوب غربی) نیز می‌تواند مسیرهای ترجیحی جهت حرکت آب در

محیط را ایجاد کند. با توجه به اینکه جریان آب تازه از محل چشمه‌های P3 و P4 رخ نمی‌دهد، تعیین قطعی ارتباط هیدرولیکی بین این دو چشمه با استفاده از تغییرات شیمیایی امکانپذیر نمی‌باشد و نوسانات کلی تراز آب و دیدگاه هیدروژئولوژیکی مبتنی بر ساختار شکستگی‌ها و وضعیت اولیه توپوگرافی منطقه می‌تواند در تفسیر هیدرولیک این محدوده کمک کند. علاوه بر شکستگی با راستای تقریبی شمال شرقی - جنوب غربی، عبور یک گسل از محل چشمه با راستای جنوب شرقی - شمال غربی نیز می‌تواند عامل مستعد دیگری در آبدهی هر چند اندک ولی مداوم این چشمه شود. در این مورد باید به این نکته اشاره کرد که به نظر می‌رسد تعیین تأثیر هر یک از ساختارهای ذکر شده در تأمین آب چشمه P3 با توجه به عدم اطلاعات کافی از آبدهی چشمه در بازه بلند مدت و همچنین عدم دسترسی به آب تازه در این محدوده جهت تفسیر ارتباط دقیق هیدرولیکی با استفاده از مطالعه هیدروژئوشیمیایی امکانپذیر نیست. بنابراین با توجه به وضعیت موجود، به نظر می‌رسد محتمل‌ترین مکانیسم آبدهی این چشمه می‌تواند نشت آرام آب از مسیر شکستگی‌های شمال شرقی - جنوب غربی منطقه و همچنین نفوذ بسیار آرام‌تر آب از خلال بخش‌های درز و شکافدار با راستای تقریبی جنوب شرقی - شمال غربی دانست. لازم به ذکر است وجود پوشش گیاهی رشد کرده بر بستر خاکی با ضخامت چند متری نشان از شبکه (محیط متخلخل با تخلخل دانه‌ای اولیه یا محیط درز و شکافدار با تخلخل ثانویه) اشباع از آب در اعماق کم دارد. همچنین باید توجه داشت که عدم جریان بالای آب در این منطقه نیز می‌تواند به دلیل مصرف بخش عمده‌ای از آب ورودی به این محدوده توسط پوشش گیاهی باشد زیرا بخش‌های بالایی و به تعبیری ترازهای توپوگرافی بالاتر که در مسیر جریان آب قرار دارند توسط این گیاهان پوشیده شده است. نکته‌ای که در این مورد نیز باید مورد توجه قرار گیرد، بالا بودن توان محدوده اطراف چشمه P3 از نظر خروج آب به صورت تبخیر است. وجود مواد ریز دانه متراکم نشده در قشر بالایی این محدوده موجب افزایش حرکت موینه آب شده و به این صورت بخش از آب موجود در شبکه زیرین در معرض تبخیر قرار

یا ساختارهای درز و شکافدار را برای برونزد آب (چشمه یا سطح نشستی) در نظر گرفت. بررسی‌های صحرایی نشان از توسعه محدود حفرات ناشی از لیچینگ کانی‌های سولفیدی در سیستم اپی ترمال کربناته موجود در منطقه (از نظر اندازه و پراکندگی) دارد و به این ترتیب می‌توان تأثیر این عامل را پایین دانست. تعیین مکانیسم هیدرولیکی این ساختارها نیازمند دسترسی به عکس‌العمل چشمه نسبت به تغییرات بارندگی در بازه بلندمدت است. وجود سیستم‌های درز و شکافدار بسیار گسترده در سطح منطقه و همچنین وجود توده‌های هوازده و سست خاکی می‌توانند به ترتیب تأثیر عامل دوم و سوم ذکر شده در بالا را در اعماق مختلف تقویت کنند. بنابراین به طور کلی، چنین رخنمون‌های آبی به دو دلیل عمده سرریز شدن از رسوبات اشباع از آبی که از پایین با لایه‌ای ناتراوا یا کم تراوا محصور شده باشد و یا انتقال از مسیر یک شکستگی با طول بلند ایجاد می‌شود. در این مورد باید خاطر نشان کرد که اثر دوگانه درزه‌ها در هدایت و یا سد کردن مسیر جریان آب را نیز نباید فراموش کرد.

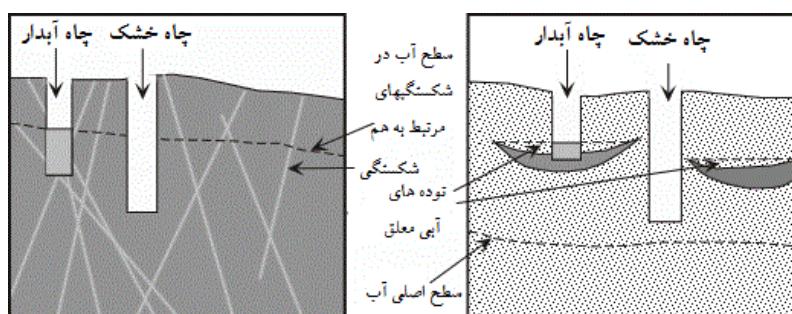
می‌گیرد. بررسی محدوده اطراف سایت هیپ لیچینگ در بخش‌های جنوب شرقی و نزدیک به مجرای عبور جریانات سطحی ناشی از چشمه P3 (و البته جریانات سطحی محدوده قبل از خاکبرداری) نشان می‌دهد که برخی ساختارهای نشستی با روندی مشخص رخنمون پیدا کرده است (شکل ۱۳). بررسی وضعیت نوسان سطح آب در محدوده مطالعاتی (عمق متفاوت برخورد به سطح آب زیرزمینی) و همچنین وجود برخی مناطق خشک و بدون آب علیرغم نفوذ برخی گمانه‌ها به اعماق بالا (BH-5) نشان می‌دهد که سطح آب واحدی را نمی‌توان برای این ناحیه در نظر گرفت.

مسیر عبور درز و شکاف‌ها، شناسایی جهت حرکت آب و به تبع آن پیش‌بینی برخورد به سطح آب در محل خفر گمانه تقریباً با خطای زیادی همراه است. این وضعیت را در شکل ۱۴ (سمت چپ) می‌توان به صورت شماتیک مشاهده کرد. همچنین در خصوص سطوح نشستی با ساختار و روند خطی (شکل ۱۳) نیز می‌توان سه حالت حفرات انحلالی (کارستی)، سطوح آبی معلق





شکل ۱۳. امتداد سطوح نشتی در بخش جنوب شرقی محدوده سایت هیپ لیچینگ بر روی تصویر ماهواره‌ای (خط قرمز در تصویر بالا) و تصویر تهیه شده از نقاط مورد بحث در منطقه. در تصویر بالا (دید به سمت شمال شرقی)، مربع‌های قرمز رنگ نقاط نمونه‌برداری آب و دایره‌های زرد رنگ محل گمانه‌های و ثبت سطح آب را نشان می‌دهد.

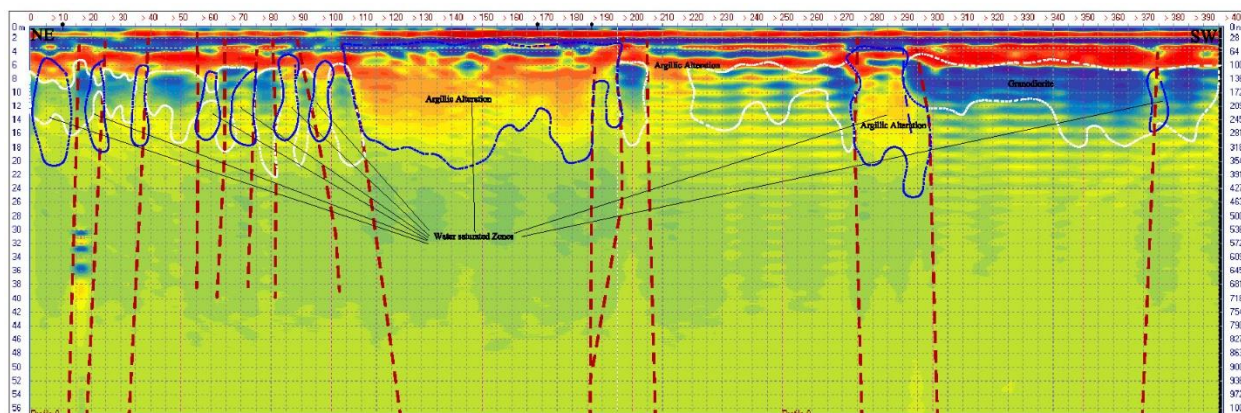


شکل ۱۴. ساختار مفهومی قابل استفاده جهت تفسیر تغییرات سطح آب و پدیده‌های هیدرولیکی مشاهده شده در محدوده سایت هیپ لیچینگ معدن سونگون. در تصویر سمت راست سطح معلق آب در محیط غیراشباع و در تصویر سمت چپ ناهمگنی بسیار بالای ناشی از درز و شکاف در سازندهای سخت نمایش داده شده است.

بر اساس بازدیدهای میدانی، لایه‌های هوازده رویی با ضخامت‌های مختلفی سطح محدوده را پوشانده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در برخی مناطق، ریزدانه بودن این رسوبات و تجمع آن‌ها در مناطق پایین دست (در مسیر فرسایش آبی منطقه به سمت پایین) و دهانه آبراهه‌ها مستعد ذخیره مقدار نه چندان زیادی از جریان‌ات نفوذی به درون زمین است. ریزدانه بودن محیط در اینگونه محیط‌ها موجب می‌شود آب ذخیره شده به مرور افزایش یافته و اشباع‌شدگی خاک افزایش یابد. اشباع‌شدگی مداوم خاک در رسوبات آبشویی شده و فرسایش یافته به ویژه در مناطقی با شیب بالا می‌تواند شرایط را برای زمین لغزش مستعد کند. در اعماق بیشتر و در زیر لایه‌های هوازده رویی، ساختارهای سنگی با درز و شکاف‌های فراوان وجود دارد. این شکستگی‌ها موجب انتقال آب نفوذی از لایه‌های رویی به اعماق بیشتر می‌شوند. در صورتیکه محلی برای خروج آب در منطقه وجود نداشته باشد و با این شرط که با افزایش عمق از تراکم درزه‌ها و همچنین عمق نفوذ آن‌ها کاسته شود، سیستم قابلیت تشکیل یک آبخوان یا مخزن ذخیره آب را پیدا خواهد کرد. بررسی‌های ژئوفیزیکی انجام شده در این محدوده نیز نشان می‌دهد که در برخی نقاط نزدیک به سطح می‌توان مکان‌های تجمع آب را مشاهده کرد. این شرایط گاهی در امتداد شکستگی‌های و درز و شکاف‌های متراکم و در برخی موارد نیز در زیر لایه‌های هوازده سطحی و در مرز لایه‌های سخت زیرین مشاهده می‌شود. در شکل ۱۵ مقطعی از یک مسیر اسکن شده توسط ابزارهای ژئوفیزیکی به عنوان مثال نمایش داده شده است (شرکت زمین، آب، پی ۱۳۹۵). بنابراین، با توجه به وجود توده‌های موضعی آب در محل تراکم درز و شکاف‌ها و ایجاد منابع

خاکبرداری موجب شده است که بخش‌های هوازده رویی برداشته شده و به این طریق اختلاف عمق برخورد به سطح آب در بخش‌های دست نخورده و بخش‌های درون سایت به حداکثر برسد. این بدان معنی است که تراز عمومی آب در آبخوان‌ها و همچنین تا حدود زیادی در سازندهای سخت از توپوگرافی زمین تبعیت می‌کند و انتظار می‌رود شبکه درز و شکافدار در اعماق خاصی اشباع از آب باشد. میزان آب موجود در شکستگی‌ها، سرعت حرکت، پتانسیل مجاری تأمین کننده آب چشمه و مواردی این چنین به میزان ارتباط شکستگی‌ها با یکدیگر وابسته است.

آبی در اعماق کم (منطبق بر عمق بازشدگی درزه‌ها)، به نظر می‌رسد مدل مفهومی متصور شده و تفاسیر مترتب بر آن تطابق بسیار مناسبی با واقعیت منطقه دارد. در محدوده سایت مورد مطالعه (با تأکید بر چشمه P3 و تا حدودی P4)، به استثنای برخی نقاط کور و خشک (به دلیل عدم توسعه شکستگی‌ها)، به طور کلی عمق برخورد به سطح آب در ۰/۵ تا ۲ متری از سطح زمین قرار دارد. همانطوریکه پیش از این ذکر شد، این اختلاف ارتفاع به دلیل اختلاف توپوگرافی و در نتیجه گرادیان طبیعی آب زیرزمینی و حرکت آن به سمت بخش‌های جنوبی سایت می‌باشد. باید توجه داشت که عملیات



شکل ۱۵. مقطع ژئوفیزیکی در امتداد مسیر A3 (به شکل ۱ رجوع شود) و نمایش زون‌های سطحی حاوی آب در امتداد شکستگی‌ها (برگرفته از شرکت زمین، آب، پی ۱۳۹۵)

محیط خارج می‌شود. به عبارتی دیگر، میزان افت سطح آب در اینگونه شکستگی‌ها در مدت زمان بیشتری رخ می‌دهد. وجود سطوح گسلی در منطقه و تشخیص امتداد و عمق این گسل‌ها تا اعماق زیاد نشان می‌دهد که برخی مسیرهای ترجیحی عمیق را می‌توان برای جریان آب در این منطقه در نظر گرفت. ژو و لی (۲۰۱۱) نشت از خلال اکیتردها (تراوایی کم و ذخیره نسبتاً خوب) را به عنوان یک عنصر ضروری در سیستم‌های جریان منطقه‌ای و محلی در سنگ‌های سخت در نظر گرفتند (ژو و لی، ۲۰۱۱). در اینگونه موارد، شکستگی‌ها در اعماق ۱۰۰ تا ۲۰۰ متری بسته می‌شوند (پارچکو و ون در ویژدن، ۲۰۱۴؛ سانتوس و همکاران، ۲۰۱۴) و به تدریج عمق متوسط آبخوان کاسته شده و از توسعه مسیرهای جریانی جلوگیری می‌کند. تنها در یک حالت که شکستگی‌های بسیار عمیق و طولانی در منطقه

یک درزه ممکن است اشباع از آب باشد ولی با توجه به عدم ارتباط با سایر شکستگی‌ها دارای نوسانات زیادی در تراز خود نباشد و از طرفی دیگر درزه‌های مجاور آن دارای ارتباط گسترده‌تری بوده و آب وارد شده به یک مجرا از طریق یک شبکه در سطح منطقه به گردش در می‌آید و نهایتاً به نقطه خروج هدایت می‌شود. در چنین حالتی می‌توان انتظار داشت که تغییرات مداوم تراز آب (کاهش تراز به دلیل خروج آب و افزایش تراز به دلیل تغذیه) را شاهد بود. باید به این نکته نیز توجه شود که کاهش مداوم تراز آب در یک شکستگی ایزوله نیز می‌تواند به شکلی دیگر نیز رخ دهد. در این حالت که سرعت کاهش تراز بسیار کمتر از حالت اول (زمانیکه شبکه بهم پیوسته‌ای از شکستگی‌ها وجود دارد) است، آب موجود در شکستگی با توجه به تراوایی بسیار اندک محیط اطراف در مدت زمان بیشتری از

نتیجه‌گیری

وجود ترکیبات آهن‌دار در کنار ترکیبات حاوی مس و همین طور پوشیده شدن سطح درز و شکاف‌ها توسط ترکیبات کربناته و آهن‌دار در محل نمونه‌برداری چشمه‌های تشکیل شده در محدوده سایت نشان می‌دهد که توان انحلال این کانی‌ها توسط آب‌های عمقی زیاد بوده و با گذشت زمان و با توجه به افزایش غلظت این کانی‌ها در آب، محلول آبی به صورت فوق‌اشباع با مقدار SI بیشتر (مقادیر مثبت بیشتر) مشاهده خواهد شد امتداد یک گسل مدفون در راستای تقریبی جنوب شرقی-شمال غربی و در محل برونزد چشمه P3 توسط مشاهدات صحرایی و برداشت‌های ژئوفیزیکی تقریباً قطعی به نظر می‌رسد. از طرفی دیگر، برخی رگه‌های کم ضخامت آغشته به اکسید منگنز در این امتداد شناسایی شده است. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود برخی جریان‌ات محدود آبی (با توجه به دبی بسیار کم چشمه) نشأت گرفته از مناطق جنوب شرقی و در تماس با این واحد‌های منگن‌دار می‌تواند در تأمین آب این چشمه نقش داشته باشد. بررسی مقدار SI مثبت در نمونه P3 (به عنوان مهمترین چشمه موجود در سایت) نسبت به ترکیب منگن‌دار $MnHPO_4$ می‌تواند بر عبور مستمر آب از مجاری و مسیرهای حاوی این ترکیب و در نتیجه بالا بردن نرخ انحلال آن به مرور زمان (تجمع آرام این ترکیب در آب موجود در فضای درز و شکافدار) و اشباع شدن آب نسبت به این ترکیب دلالت داشته باشد. بنابراین، انتظار می‌رود آب چشمه مورد نظر با فرایند رسوبگذاری این ترکیب در محل خروجی آب مواجه باشد که این مورد به بررسی ترکیب کانی‌شناسی رسوبات تشکیل شده در این منطقه نیاز دارد. همچنین، تراز تقریبی و نزدیک به واقعیت آب زیرزمینی (بر اساس تراز آب در گمانه‌های موجود در محل مانداب شمالی و چشمه P3) و بهره‌گیری از تحلیل‌های ژئوفیزیکی که برخی مناطق اشباع را در لایه‌های سطحی نشان می‌دهد، کمک می‌کند که امکان پیشنهاد مکانیسم و مجرای ثانویه و البته با نرخ جریان ناچیز آب را در راستای شکستگی‌های شمالی-جنوبی جهت تغذیه چشمه P3 وجود داشته باشد.

وجود داشته باشد می‌توان انتظار داشت که جریان‌ات منطقه‌ای تشکیل شود. هدایت آب از شبکه درز و شکافدار به مناطقی با شکستگی بیشتر ناشی از گسل‌خوردگی و در کنار آن تمایل گرادیان هیدرولیکی و همچنین وضعیت توپوگرافی منطقه به سمت مناطق جنوبی (محل چشمه P3) موجب شده است که سطح ترشده‌گی وسیعی در این محدوده مشاهده شود. هنگامیکه آب اضافه شده به سطح زمین از طریق بارندگی به درون زمین نفوذ می‌کند می‌تواند آب‌های قدیمی‌تر موجود در لایه‌های زیرین را به اعماق پایین‌تر منتقل کند و به این طریق آب موجود در بخش غیراشباع را به منابع اصلی آب زیرزمینی ملحق می‌کند. این مکانیسم جریان تحت عنوان جریان پیستونی شناخته می‌شود. در برخی موارد، آزاد شدن هوای به دام افتاده در میان درزه‌ها و شکستگی‌ها می‌تواند مسیر را جهت جریان سریع‌تر و ناگهانی ستون آب باز کند و به این طریق موجب افزایش شانس حرکت آب در بین فضاها خالی شود. خروج حباب‌های هوا در خروجی چشمه‌ها می‌تواند به این نکته اشاره داشته باشد. در صورتیکه لایه‌های درز و شکافدار و هادی آب زیرزمینی در محل خروجی چشمه‌های تشکیل شده در مناطق سازند سخت با رسوبات پوشیده شوند، امکان مشاهده حباب‌های خروجی از محل و جریان‌ات پیستونی به حداقل می‌رسد. در اینگونه موارد، جریان آب از میان درز و شکاف‌ها ابتدا با سرعت صورت می‌گیرد ولی در بلافاصل سازند سخت و رسوبات ریزدانه رویی، جریان کاهش یافته و نرخ خروج نیز به تبع آن کاهش می‌یابد. در این حالت، جریان اولیه از نوع مجرای و سریع بوده و جریان در حالت ثانویه به صورت آرام و افشان خواهد بود. وجود اینگونه مناطق عمیق درز و شکافدار علاوه بر تأمین آسان آب برای چشمه مورد نظر و هدایت سریع آب‌های اطراف به این سمت، در تعیین محل‌های مناسب جهت کاهش تراز آب زیرزمینی به منظور عملیات اجرایی سایت هیپ لیچینگ نیز حائز اهمیت است. زهکشی این محل به هر طریق (به عنوان مثال حفر چاه و پمپاژ مداوم آن و یا حفر کانال‌ها یا زهکشی‌های افقی) می‌تواند در ایجاد اطمینان از عدم بروز مشکلات بعدی مفید باشد.

- adjacent to a hypersaline lake in NW Iran. *J Asian Earth Sci*, 147: 128-147.
- Bani Assadi, A., Doulati Ardejani, F., Karami, Gh.-H., Dahr Azma, B., Reza, A.D., Alipour, M. 2008. Heavy Metal Pollution Problems in the Vicinity of Heap Leaching No. 3 of Sarcheshmeh Porphyry Copper Mine. 10th International Mine Water Association Congress.
- Biswas, A., Nath, B., Bhattacharya, P., Halder, D., Kundu, A.K., Mandal, U., Mukherjee, A., Chatterjee, D., Mörth, C.-M., Jacks, G. 2012. Hydrogeochemical contrast between brown and grey sand aquifers in shallow depth of Bengal Basin: Consequences for sustainable drinking water supply. *Sci Total Environ*, 431: 402-412.
- Bouzourra, H., Bouhlila, Ra., Elango, L., Slama, F., Ouslati, N. 2014. Characterization of mechanisms and processes of groundwater salinization in irrigated coastal area using statistics, GIS, and hydrogeochemical investigations. *Environ Sci Pollut R*, doi:10.1007/s11356-014-3428-0
- Dai, A., Trenberth, K.E., Karl, T.R. 1999. Effects of clouds, soil moisture, precipitation and water vapor on diurnal temperature range. *J Clim*, 12: 2451-73.
- Davis, A., Heatwole, K., Greer, B., Ditmars, R., Clarke, R. 2010. Discriminating between background and mine-impacted groundwater at the Phoenix mine, Nevada USA. *Appl Geochem*, 25: 400-417.
- Deutsch, W.J., Siegel, R. 1997. *Groundwater Geochemistry: Fundamentals and Applications to Contamination*. CRC Press, 232 p. 1997.
- Dhakate, R., Singh, V.S., Hodlur, G.K. 2008. Impact assessment of chromite mining on groundwater through simulation modeling study in Sukinda chromite mining area, Orissa, India. *J Hazard Mater*, 160: 535-547.
- Emberger, L., 1955. Une classification biogéographique des climats. *Recueil Trav. Lab. Bot. Géol. Zool. Fac. Sci. Univ. Montpellier, Serie Bontanique*, 7: 3-43. (French)
- Faure, G. 1998. *Principles and applications of geochemistry*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall. 600p.
- Finkelstein, M.M., Verma, D.K. 2001. Exposure Estimation in the Presence of Nondetectable Values: Another Look. *AIHAJ - American Industrial Hygiene Association*, 62(2): 195-198.
- Guyonnet, D., Touze-Foltz, N. 2014. Assessing the risk of leakage from heap leach pads used in mining operations. *The Extractive Industries and Society*, 1: 96-103.
- Hezarkhani, A., Williams-Jones, A.E. 1998. Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran; evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Econ Geol*, 93(5): 651-670.
- Ilankoon, M.S.K., Neethling, S.J. 2016. Liquid spread mechanisms in packed beds and heaps. The separation of length and time scales due to particle porosity. *Miner Eng*, 86: 130-139.
- Ilankoon, M.S.K., Tang, Y., Ghorbani, Y., Northey, S., Yellishetty, M., Deng, X., McBride, D. 2018. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. *Miner Eng*, 125: 206-222.
- ISO 5667-11, 1993. *Water quality. Sampling. Guidance on sampling of groundwaters*.
- Kato, Y., Suzuki, K., Nakamura, K., Hickman, A.H., Nedachi, M., Kusakabe, M., Bevacqua, D.C., Ohmoto, H. 2009. Hematite formation by oxygenated groundwater more than 2.76 billion years ago. *Earth Planet Sc Lett*, 278: 40-49.
- Krásny, J., Sharp, J.M. Jr. 2003. *Groundwater in fractured rocks. Selected papers from the Groundwater in Fractured Rocks International Conference, Prague*.
- وجود سطوح گسلی در منطقه و تشخیص امتداد و عمق این گسل‌ها تا اعماق زیاد نشان می‌دهد که برخی مسیرهای ترجیحی عمیق را می‌توان برای جریان آب در این منطقه در نظر گرفت. هدایت آب از شبکه درز و شکافدار به مناطقی با شکستگی بیشتر ناشی از گسل خوردگی و در کنار آن تمایل گرا دیان هیدرولیکی و همچنین وضعیت توپوگرافی منطقه به سمت مناطق جنوبی (محل چشمه P3) موجب شده است که سطح ترشده‌گی وسیعی در این محدوده مشاهده شود. وجود اینگونه مناطق عمیق درز و شکافدار علاوه بر تأمین آسان آب برای چشمه مورد نظر و هدایت سریع آب‌های اطراف به این سمت، در تعیین محل‌های مناسب جهت کاهش تراز آب زیرزمینی به منظور عملیات اجرایی هیپ لیچینگ نیز حائز اهمیت است. زهکشی این محل به هر طریق (به عنوان مثال حفر چاه و پمپاژ مداوم آن و یا حفر کانال‌ها یا زهکش‌های افقی) می‌تواند در ایجاد اطمینان از عدم بروز مشکلات بعدی مفید باشد.
- بنابراین با توجه به تحلیل شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه، به نظر می‌رسد که پتانسیل تشکیلات و ساختارهای زمین‌شناسی منطقه و همچنین شبکه درز و شکافی موجود در این محدوده توان انتقال و ذخیره سازی بالای آب را ندارد. از طرفی دیگر نیز باید عنوان داشت که توان هیدرولوژیکی و اقلیمی منطقه در تأمین حجم قابل توجهی آب را نداشته و همین امر مانع تشکیل منابع آب زیرزمینی و یا به تعبیری آبخوان در این منطقه شده است. بنا بر آنچه تا کنون مورد ارزیابی قرار گرفت، پتانسیل ایجاد مشکلات زیست‌محیطی در این سایت به دلیل نشت از لایر سایت هیپ لیچینگ و همچنین آلودگی در وسعت نگران کننده وجود نخواهد داشت. با این وجود، اقدامات لازم برای زهکشی آب‌های تجمع یافته در نقاط برونزد پیدا کرده کنونی می‌تواند میزان ریسک ایجاد مشکلات زیست محیطی را به کمترین مقدار خود برساند.

منابع

شرکت مهندسین مشاور زمین، آب، پی. ۱۳۹۵. بررسی علل ایجاد

چشمه‌ها در محل اجرای پروژه هیپ لیچینگ سونگون.

Amiri, V., Nakhaei, M., Lak, R. 2017. Using radon-222 and radium-226 isotopes to deduce the functioning of a coastal aquifer

- Petersen, J. 2016. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – a brief overview. *Hydrometallurgy*, 165: 206-212.
- Santos, R.M.B., Sanches Fernandes, L.F., Moura, J.P., Pereira, M.G., Pacheco, F.A.L. 2014. The impact of climate change, human interference, scale and modeling uncertainties on the estimation of aquifer properties and river flow components. *J Hydrol*, 519: 1297-314.
- Scott, T.B., Allen, G.C., Heard, P.J., Randell, M.G. 2005. Reduction of U(VI) to U(IV) on the surface of magnetite. *Geochim Cosmochim Acta*, 69: 5639-5646.
- Sohrabi, N., Kalantari, N., Amiri, V., Nakhaei, M. 2017. Assessing the chemical behavior and spatial distribution of yttrium and rare earth elements (YREEs) in a coastal aquifer adjacent to the Urmia Hypersaline Lake, NW Iran. *Environ Sci Pollut Res*, 24(25): 20502-20520.
- Succop, P.A., Clark, S., Chen, M., Galke, W. 2004. Imputation of Data Values That are Less Than a Detection Limit. *J Occup Environ Hyg*, 1(7): 436-441.
- Sun, D. 2011. *Handbook of Food Safety Engineering*. John Wiley & Sons. 840 pp.
- Thiel, R., Smith, M.E. 2004. State of the practice review of heap leach pad design issues. *Geotext Geomembranes*, 22, 555-568.
- White, A.F., Peterson, M.L. 1996. Reduction of aqueous transition metal species on the surfaces of Fe(II)-containing oxides. *Geochim Cosmochim Acta*, 60: 3799-3814.
- Zhou, Y., Li, W. 2011. A review of regional groundwater flow modeling. *Geosci Front*, 2(2): 205-14.
- Moncur, M.C., Ptacek, C.J., Blowes, D.W., Jambor, J.L. 2005. Release, transport, and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Appl Geochem*, 20: 639-659.
- Nordstrom, D.K. 2011. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. *Appl Geochem*, 26: 1777-1791.
- Otake, T., Wesolowski, D.J., Anovitz, L.M., Allard, L.F., Ohmoto, H. 2007. Experimental evidence for non-redox transformations between magnetite and hematite under H₂-rich hydrothermal conditions. *Earth Planet Sc Lett*, 257(1-2): 60-70.
- Pacheco, F.A.L., Van der Weijden, C.H. 2014a. Role of hydraulic diffusivity in the decrease of weathering rates over time. *J Hydrol*, 512: 87-106.
- Pacheco, F.A.L. 2015. Regional groundwater flow in hard rocks. *Sci Total Environ*, 506-507: 182-195.
- Pacheco, F.A.L., Van der Weijden, C.H. 2014b. Modeling rock weathering in small watersheds. *J Hydrol*, 513: 13-27.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J. 1999. User's Guide to PHREEQC (version 2), a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. US Geological Survey. Water Resources Investigations Report. 99-4259.