

هیدروژئوشیمی سیالات گرمابی مخازن ژئوترمال غرب سبلان - شمال غرب ایران

سید غفور علوی^{۱*}، حسین ناصری^۲، سهیل پرخيال^۳، مهناز جمادی^۴

۱- استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تبریز

۳- دکتری مکانیک سیالات، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر ایران، تهران

۴- کارشناسی ارشد پتروژئولوژی، دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول: ghaforalavi@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۰۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۴

چکیده

منبع زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان به علت قرار داشتن در محدوده‌ی آتشفشان‌های فعال عهد حاضر، وجود منبع گرمایی در عمق چند هزار متری و دارا بودن دمای مخزن بالای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد (تقریباً ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد) و تزریق ماگما به زیر لایه‌های زیر مخزن در دسته‌ی سیستم‌های زمین‌گرمایی همرفتی دارای آنتالپی زیاد که از لحاظ فاز مایع نسبت به فاز بخار غالب است، قرار می‌گیرد. از لحاظ ترکیب چشمه‌های مشکین‌شهر بیش‌تر در محدوده‌ی آب‌های دارای ترکیب سدیم - کلرید، سدیم- بی کربنات و سدیم- سولفات قرار می‌گیرند و سیالات چاه‌های اکتشافی در محدوده‌ی سدیم- کلرید قرار می‌گیرند در این مطالعه از چاه‌های اکتشافی حفر شده در سایت بهره‌برداری از انرژی گرمایی واقع در شمال غرب سبلان (NWS-1, NWS-3, NWS-4) نمونه‌برداری و ترکیب شیمیایی و ایزوتوپی این نمونه‌ها ارزیابی شده است. آب‌های مشکین‌شهر در زیر خط تعادل بخشی در محدوده‌ی آب‌های ایمنمچور در گوشه‌ی Mg و سیالات چاه‌ها نزدیک به خط تعادل کامل قرار گرفته‌اند. آب‌ها (ایمنمچور) دمای تقریبی در حدود ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و سیالات چاه‌ها دمایی در حدود ۲۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مخزن ژئوترمال را نشان می‌دهند. با توجه به لیتولوژی منطقه مهم‌ترین روش شیمیایی برای ترمومتری آب‌های گرمابی در این ناحیه روش Na-K است، در چشمه‌های شمال غرب ژئوترموترهای اندازه‌گیری شده به ترتیب دمایی در حدود ۲۷۰-۱۴۰، ۲۲۰-۵۰، ۲۳۰-۳۰، ۱۶۰-۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نشان می‌دهند. میزان تریتیوم در این سیالات نشان‌دهنده‌ی اختلاط با آب‌های زیرزمینی جوان است. رنج δD و $\delta^{18}O$ برای چشمه‌های شمال غرب سبلان به ترتیب از ۸- تا ۱۳- و ۸۵- تا ۷۰- در هزار است. این آب‌ها در محدوده‌ی آب‌های متئوریتی قرار گرفته‌اند. با توجه به داده‌های $\delta^{13}C$ حاصل از آنالیز CO_2 جمع شده از سیالات منطقه به احتمال زیاد منشأ CO_2 آب‌های منطقه‌ی سبلان سنگ آهک است.

واژه‌های کلیدی: هیدروژئوشیمی، مخازن ژئوترمال، ایزوتوپ، سبلان، ایران.

مقدمه

مهندسان مشاور نیوزلندی (KML) با هدف احداث نخستین

فعالیت‌های طرح ژئوترمال در قالب فاز اکتشافی شامل نیروگاه زمین‌گرمایی در ایران از سال ۱۳۷۷ شروع و با تعیین مطالعات ژئوفیزیک، ژئوشیمی و زمین‌شناسی با همکاری نقاط حفاری‌های اکتشافی، مطالعه در فاز اکتشافی در سال

هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی مطالعاتی را انجام داده‌اند. در این مطالعه نیز به منظور تعیین رخساره‌های هیدروشیمیایی، ویژگی‌های ایزوتوپی، دمای مخازن ژئوترمال و شناسایی فرآیندهای ژئوشیمیایی اصلی که ممکن است سیالات را تحت تأثیر قرار دهند، سیالات درون چاه و چشمه‌های آب‌گرم و سرد منطقه مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی هر یک از اهداف ذکر شده، نمونه‌های آبی از چشمه‌های آب گرم و سرد منطقه و سیالات درون چاه در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای فیزیکوشیمیایی مانند pH و دما در صحرا اندازه‌گیری شده است. در حالی که در بخش آزمایشگاهی ویژگی‌هایی مانند پتاسیم، سدیم، منیزیم، و عناصری مانند B, Cs, Sr, Fe, Li, Rb, Ba به روش پلاسمای جفت‌دهی القایی (ICP) در آزمایشگاه CNC وایراکی (Wairakei) آنالیز شده‌اند و مقدار سیلیس توسط اسپکترومتر HACH DR/2000 تعیین شده است. آنالیزهای ایزوتوپ‌های پایدار نیز با استفاده از اسپکترومتر جرمی - ایزوتوپی در آزمایشگاه CNC ولینگتون (Wellington) اندازه‌گیری شده است. در این مطالعه به منظور بررسی ترکیب شیمیایی سیالات درون چاه‌های اکتشافی و رخساره‌های گرمایی سبلان، از نمودارهای پایپر (گیگنباخ، ۱۹۹۱) استفاده شده است. این نمودارها در واقع براساس کاتیون‌ها (Mg^{+2} , Ca^{+2} , K^{+} , Cl^{-}) و آنیون‌های (HCO_3^{-} , SO_4^{-2} , Cl^{-}) سازنده‌ی اصلی در آب‌های گرمایی و زیرزمینی طراحی شده است. بر این اساس شیمی رخساره‌های گرمایی شمال غرب سبلان شامل رنج کاملی از ترکیبات مشاهده شده در دیگر سیستم‌های ژئوترمال جهان است. یکی از اهداف مهم در اکتشاف مخازن ژئوترمال، تخمین دمای زیر سطحی در مخازن از ترکیبات ژئوشیمی و ایزوتوپی رخساره‌های گرمایی است. در طول چند دهه‌ی اخیر ژئوترموترهای ایزوتوپی و شیمیایی مختلفی تحت شرایط

۱۳۷۸ به پایان رسید. عملیات حفاری نخستین چاه‌های اکتشافی زمین‌گرمایی این طرح از سوی پیمانکار حفاری (شرکت حفاری ایران) و با نظارت کارشناسان نیوزیلندی (SKM) صورت گرفت. بر اساس مطالعات گروه نیروگاهی دفتر انرژی زمین‌گرمایی، عملیات حفاری در آبان ماه سال ۱۳۸۱ آغاز گردید و طی ۱۸ ماه سه حلقه چاه اکتشافی حفاری شد. نخستین چاه اکتشافی زمین‌گرمایی مشکین‌شهر (NWS-1) به صورت عمودی با عمق ۳۱۹۷ متر و دمای بالغ بر ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد حفر شده است. چاه اکتشافی دوم (NWS-3) به صورت انحرافی به عمق ۳۱۷۷ متر حفر شده که دمای انتهای چاه ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد است و پس از آن چاه اکتشافی سوم (NWS-4) به صورت انحرافی و به عمق ۲۲۶۰ متر و با دمای ۲۱۱ درجه سانتی‌گراد حفاری شد. پس از پایان حفاری چاه‌های اکتشافی تجهیزات فلزی آزمایش چاه بر روی چاه‌ها نصب و اجرا گردید.

محققان زیادی سیستم ژئوترمال سبلان را مطالعه کرده‌اند. صفارزاده و نوراللهی (۲۰۰۵) یوسفی و همکاران (۲۰۱۰) به ترتیب مطالعاتی را در مورد پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه ژئوترمال در ایران و انرژی ژئوترمال و کاربردهای آن در ایران انجام داده‌اند. یوسفی و همکاران (۲۰۱۰) در دانشگاه کیشو نقشه‌های پتانسیل‌یابی منابع ژئوترمال ایران را تهیه کرده‌اند. بروملی و همکاران (۲۰۰۰)، طالبی و رضوانی (۲۰۰۵) و پرخیال و همکاران (۲۰۱۰) اکتشافات ژئوفیزیکی ناحیه ژئوترمال سبلان را بررسی کرده‌اند. پرخیال و همکاران (۲۰۱۰) ویژگی‌های ژئوشیمیایی سیالات ژئوترمال منطقه شمال غرب سبلان و ژئوشیمی عنصری و ایزوتوپ‌های پایدار سیالات ژئوترمال منطقه شمال غرب را مطالعه کردند. معصومی و همکاران (۲۰۱۶) سیستم زمین‌گرمایی سبلان از نظر هیدروژئوشیمیایی و ترکیب ایزوتوپی سیالات ارزیابی گردید. معصومی و همکاران (۲۰۱۷) میدان زمین‌گرمایی بوشدی در جنوب سبلان را از نظر زمین‌شناسی و هیدروژئوشیمیایی ارزیابی نموده‌اند. هادیپور هفشجانی و همکاران (۱۳۹۷) و حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) در رابطه با

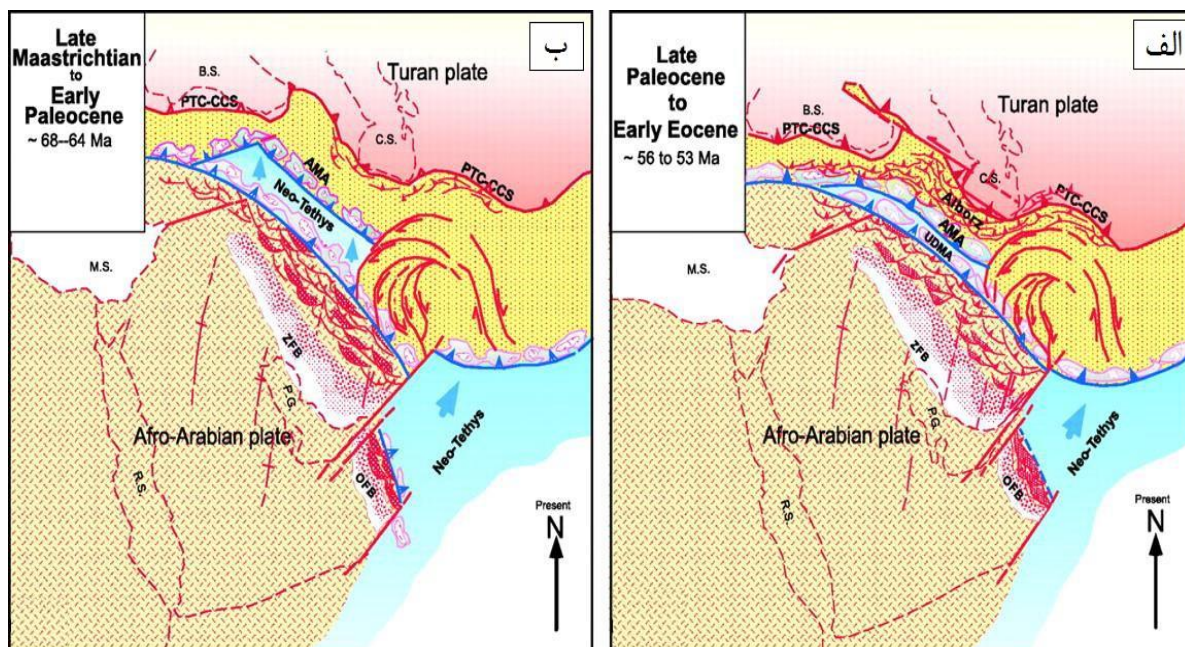
لیتوسفر قاره‌ای شمال غرب است این فرورانش از کرتاسه پسین (مائس تریشتین) متعاقب با شکل‌گیری کمان ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) و تشکیل رشته کوه زاگرس، آغاز شو و طی پالئوسن و به ویژه ائوسن این فرایند فرورانش شدیدترین ماگماتیسم را به البرز در حال کوهزایی، تحمیل کرد. ولکانیسم گسترده ائوسن در البرز غربی و آذربایجان حاصل این فرایند بوده است.

مطابق شکل ۱ (الف) تا ائوسن میانی، فرایند فرورانش باقی‌مانده لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس اتمام یافته و در ادامه همگرایی، کمان ماگمایی البرز (AMA) و ارومیه-دختر (UDMA) با همدیگر برخورد می‌کنند و یک زمین‌درز برخوردی از نوع کمان-کمان در شمال غرب ایران شکل می‌گیرد. پلوتونیسم گسترده الیگوسن و ولکانیسم پلايو-کواترنری در البرز غربی، آذربایجان و ترکیه (دماوند، سبلان و آرات) حاصل از ماگماتیسم پس از برخوردی هستند که خود نتیجه ادامه فعالیت گوه آستنسفری بالای ورقه لیتوسفری فرورانده می‌باشد (شکل ۱ ب).

متفاوت گسترش یافته‌اند. ژئوترمومتری امکان تخمین دمای سیالات مخزن را میسر می‌کند. برای انجام ژئوترمومتری بر پایه مواد محلول، روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود که هرکدام به عنوان ردیاب حرارتی توجه دارد. ژئوترمومتری Na-K را فورنر (۱۹۷۹)، آمورسون و همکاران (۱۹۸۳)، آنورسون (۱۹۸۵) و گیگنباخ (۱۹۸۸)، ژئوترمومتری Na-K-Ca را فورنر و ترودل (۱۹۷۳)، ژئوترمومتری Na-Li را فویلاک و میچارد (۱۹۸۱) و خارکا و همکاران (۱۹۸۲) پیشنهاد کردند.

زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه در شمال و شمال غرب ایران بین طول جغرافیایی ۴۷°، ۴۰' - ۴۷°، ۵۵' و عرض جغرافیایی ۲۵°، ۳۸' - ۳۸°، ۱۰' قرار گرفته است. از نظر تکتونیکی منطقه مورد مطالعه بخشی از دامنه‌های شمال غربی سبلان می‌باشد که جزئی از فلات مرتفع آذربایجان است. سبلان یک عضو جوان از مجموعه آتشفشانی سنوزوئیک و متعلق به کمان ماگمایی البرز است (علوی، ۲۰۰۷). کمان ماگمایی البرز (AMA) (شکل ۱) خود حاصل فرورانش بخشی از حوضه اقیانوسی نئوتتیس به زیر



شکل ۱- الف) توالی نقشه‌های دیرینه زمین‌ساختی خاورمیانه از اواخر کرتاسه تا ائوسن، زمین ساخت برخوردی در بخش مرکزی کوهزاد آلپ- هیمالیا (ترکیه، ایران و پاکستان...) و ب) حاصل از همگرایی سرزمین‌های جنوبی (پلیت آفرورب) و شمالی (پلیت توران)، (اقتباس از علوی، ۲۰۰۷ و فریدی، ۱۳۸۹).

مشخصات رخساره‌های گرمابی سبلان

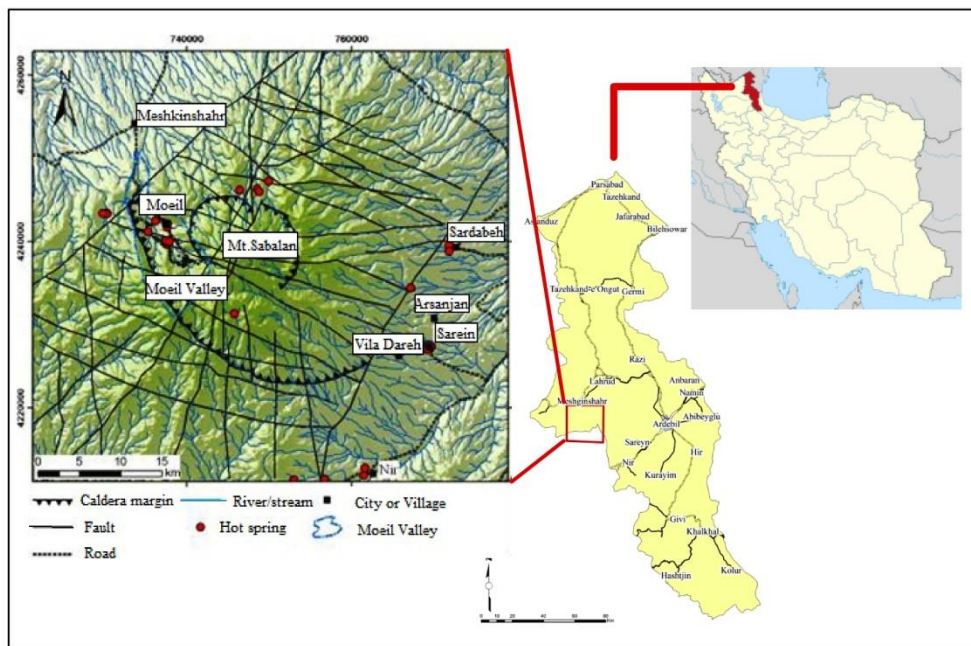
- چشمه‌های قطور سوئی: این مجموعه در دامنه‌ی شمالی سبلان و در روستای قطور سوئی قرار دارند.

- چشمه‌های سرعین: این مجموعه در دامنه‌ی شرقی سبلان قرار گرفته‌اند.

- چشمه‌های برجلی و میدان توس - هوشنگ که به ترتیب در دامنه‌ی جنوبی و جنوب غرب قطور سوئی قرار گرفته‌اند. با توجه به قرار گرفتن چشمه‌های مشکین شهر در موقعیت پروژه (شمال غرب سبلان) بیش تر به بررسی این چشمه‌ها پرداخته شده است (شکل ۲).

به طور کلی رخساره‌های گرمابی اطراف کوه سبلان را می‌توان با توجه به موقعیت‌شان به ۴ گروه تقسیم‌بندی کرد:

- چشمه‌های مشکین شهر: این مجموعه که چشمه‌های شمال غرب سبلان را تشکیل می‌دهند، در روستایی موئیل و در دامنه‌ی شمال غرب سبلان قرار دارند. این چشمه‌ها دارای ماکزیمم دما هستند (قینرجه با دمای ۸۵ درجه سانتی گراد در دره‌ی موئیل).



شکل ۲- موقعیت کوه سبلان و چشمه‌های آب گرم در شمال غرب ایران (نوراللهی ۲۰۰۸)

- روانه‌های گدازه‌ای تراکی - آندزیتی، گنبدها و لاهارهای پلیوستوسن پایانی که مربوط به بعد از تشکیل دهانه هستند.

- گنبدها و روانه‌های گدازه‌ای از جنس تراکی - داسیت و تراکی - آندزیت با سن پلیوستوسن آغازی که هم‌زمان با به وجود آمدن دهانه تشکیل شده‌اند.

- گدازه‌های تراکی - آندزیتی، توف‌ها و آذر آواری‌های پلیوسن که قبل از تشکیل دهانه فوران کرده و در سطح گسترده شده‌اند.

چهار واحد سنگ چینه‌ای فوق برای اهداف کاربردی و به ویژه به منظور سهولت استفاده در برنامه‌های اکتشاف منابع زمین گرمایی منطقه‌ی سبلان، تحت عنوان سازند (شکل ۳) و با نام‌های

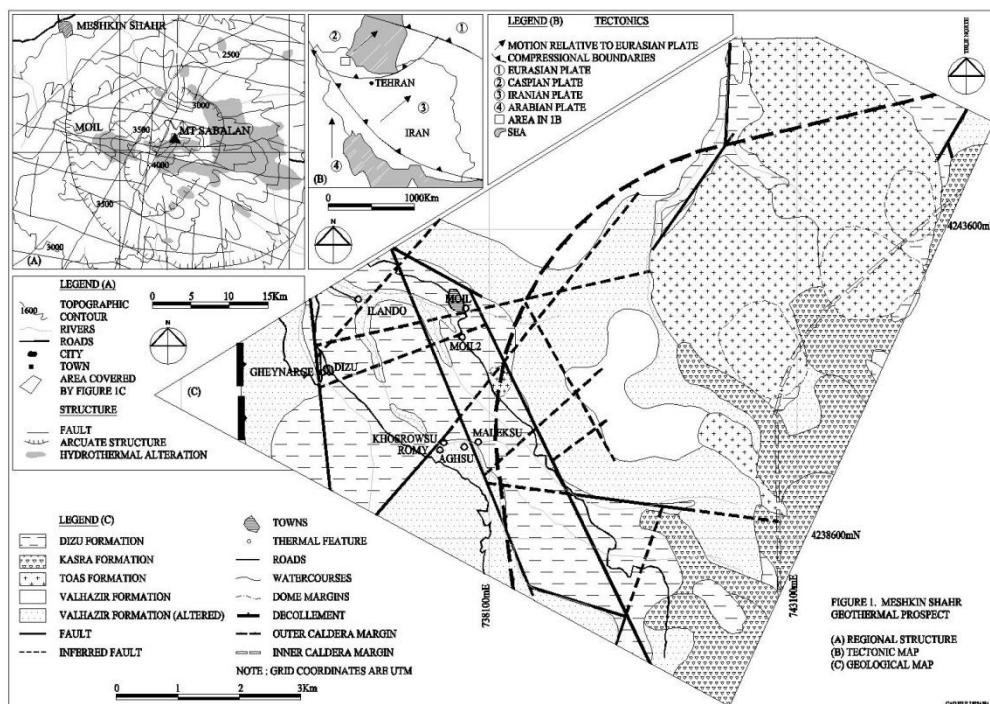
آب‌های گرم شمال غرب سبلان (گروه مشکین شهر)

سنگ‌شناسی:

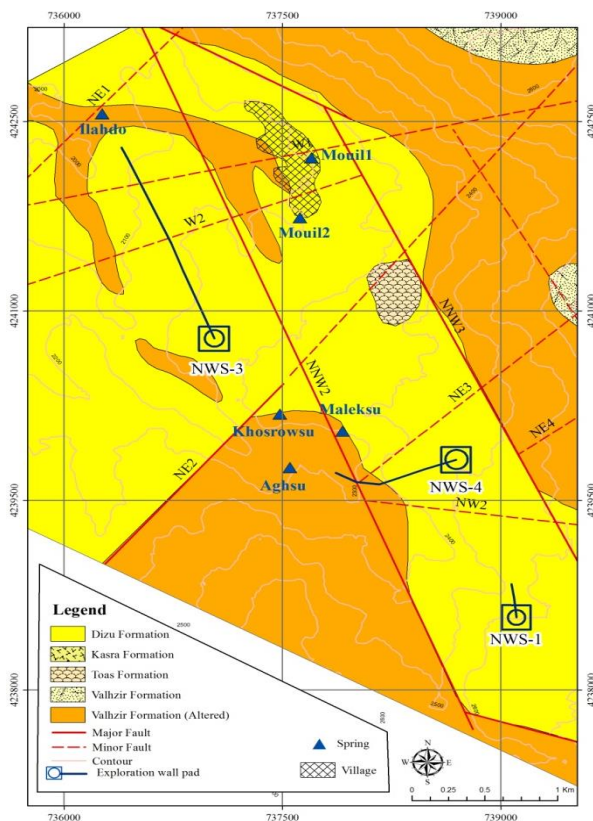
تنوع سنگ‌شناسی رخمون‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه، مربوط به تشکیل واحدهای سنگی در فازهای مختلف آتشفشانی است. لذا براساس واحدهای سنگی - زمانی موجود می‌توان توالی سنگ چینه‌ای را در منطقه برحسب افزایش سن از بالا به پایین به شرح زیر مشخص نمود.

- رسوب‌های آبرفتی، پادگانه‌های آبرفتی و مخروط افکنه‌های متعلق به هولوسن.

محلی معرفی شده‌اند (سحابی و همکاران، ۱۹۹۹: بوگی و شده در نقشه زمین‌شناسی (سحابی، ۱۳۷۸)، به شرحی که در همکاران، ۲۰۰۰: کی ام ال، ۱۹۹۹) وضعیت توالی واحدهای یاد شکل ۴ آمده، تکمیل گردیده است.



شکل ۳- موقعیت سازندهای مختلف در شمال غرب سبلان (بوگی ۲۰۰۰)



شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی دره موئیل شمال غرب سبلان (سحابی، ۱۳۷۸) و موقعیت چاههای اکتشافی بر روی آن

میزان نسبی Cl^- ، HCO_3^- و SO_4^{2-} در دیاگرام Cl^- - SO_4^{2-} - HCO_3^- (گیگنباخ، ۱۹۹۱) در شکل ۵ (الف) نشان داده شده است. این نمودار برای نشان دادن آب‌های با منشأ عمیق، pH خنثی و همچنین تمایز آب‌های Cl^- دار (نزدیک به گوشه‌ی کلرید) از آب‌های خارجی ثانویه با ترکیب $(SO_4^{2-}-HCO_3^-)$ و آب‌های ولکانیکی با ترکیب $(Cl^- - SO_4^{2-})$ استفاده می‌شود. میزان S ، Cl^- در این آب‌ها به ترکیب بخارهای ماگمایی اولیه بستگی دارد (گیگنباخ، ۱۹۹۷). آب‌های حاوی Cl^- در همه‌ی گروه‌ها مشاهده می‌شود، با این حال آب‌های موئیل حدود 1 mg/kg نسبتاً رقیق‌تر از بقیه‌ی آب‌های گروه شمال غرب سبلان هستند. بیشترین مقدار کلرید در چشمه‌های ایلاندو و قینرجه قابل مشاهده است (جدول ۱). نسبت بالای SO_4^{2-}/Cl^- در بعضی از چشمه‌های سبلان حاکی از رسوب سولفیدهایی مانند پیریت، سولفات‌هایی مانند انیدریت و آلونیت و یا به علت حضور سولفورهای فلزی است. رخداد این کانی‌ها در جایی که این چشمه‌ها وجود دارند نیز قابل مشاهده است آب‌هایی که در روی خط Cl^- - SO_4^{2-} قرار می‌گیرند، ایمچور و به احتمال زیاد منشأ ماگمایی دارند.

محتوی $Mg-Ca-K+Na$

غلظت‌های نسبی آنیون‌ها نشان می‌دهد که این آب‌ها می‌توانند در گروه SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، Cl^- و یا مخلوطی از این سه قرار گیرند. بنابراین اغلب نمونه‌ها طبق شکل ۵ (ب) رنج ترکیبی در محدوده‌ی Cl^- - Na ، $Na-HCO_3^-$ خواهند داشت. نسبت‌های متغیر HCO_3^-/SO_4^{2-} در آب‌های غنی از Na دو علت می‌تواند داشته باشد: ۱- انحلال کانی‌های سولفیدی تحت شرایط اکسیداسیون که موجب تشکیل H_2SO_4 و خنثی شدن بعدی H_2SO_4 به وسیله‌ی واکنش با سیلیکات‌ها (به طور عمده فلدسپارها) خواهد شد (احمد و همکاران، ۲۰۰۱). ۲- اشتقاق H_2CO_3 از انحلال کانی‌های سیلیکاته (عمدتاً فلدسپار) آب‌های با ترکیب $Na-SO_4^{2-}$ توسط فرآیندهای اولیه به وجود می‌آیند در حالی که آب‌های $Na-HCO_3^-$ نتیجه‌ی عملکرد فرآیندهای ثانویه هستند.

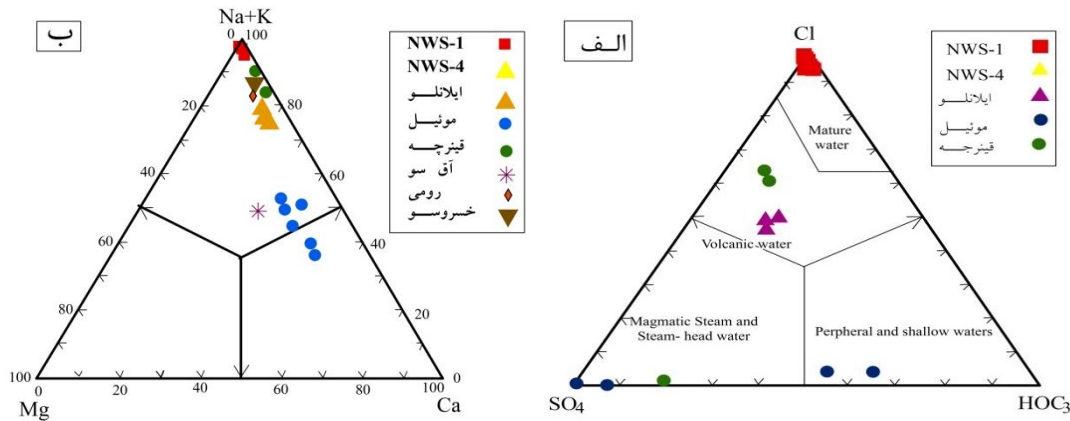
هیدروژئوشیمی سیالات چاه‌های اکتشافی NWS-1 و NWS-4

اغلب چشمه‌های مهم از لحاظ ژئوترمالی در منطقه‌ی سبلان، کلرید خنثی هستند و در ایلاندو و قینرجه در منطقه‌ی شمال غرب سبلان نزدیک روستای موئیل قرار دارد. یک چشمه‌ی کلرید به نام خسروسو نیز در جنوب واقع شده است. چشمه‌های رومی و ملک‌سو چشمه‌هایی هستند که از کلرید رقیق شده‌اند (اکسیداسیون H_2S به طور آشکارا باعث اسیدی شدن و کاهش کلرید گردیده است). چشمه‌های موئیل و آق‌سو دارای کلرید پایین، ترکیب SO_4^{2-} اسیدی و غلظت سولفات بالا (750 mg/kg) هستند (جدول ۱). بیش‌تر رخساره‌های قسمت غربی در گروه مشکین‌شهر آب‌های بی‌کربنات رقیق با دمایی در حدود $25-5^\circ C$ درجه سانتی‌گراد هستند. این رخساره‌ها شامل ایقرخ، جین بلاغ، یل‌سو، وله‌زیر و قرخ‌بلاغ هستند که دارای pH بالا (حدود $7/5$) و در مقایسه با رخساره‌های شرق و جنوب کانی‌زایی پایینی دارند. آنالیز این سیالات نشان می‌دهد که آنیون و کاتیون غالب در این سیالات به ترتیب Cl^- (300 mg/kg) و Na و K ($1800-1300\text{ mg/kg}$) است. Ca و SO_4^{2-} به ترتیب رنجی در حدود $250-350\text{ mg/kg}$ و $25-50\text{ mg/kg}$ دارند. pH این سیالات از ۷ تا $9/5$ متغیر است (جدول ۱).

هیدروژئوشیمی رخساره‌های گرمابی

با توجه به شکل‌های ۵ (ب) و ۶ سیالات گرمابی منطقه را می‌توان به سیالات با ترکیب شیمیایی زیر تقسیم‌بندی کرد: $NaCl$ (سدیم - کلرید)، Cl^- - HCO_3^- - SO_4^{2-} (کلرید-بی‌کربنات-سولفات)، HCO_3^- - SO_4^{2-} (بی‌کربنات-سولفات)، Cl^- - SO_4^{2-} (کلرید-سولفات)، $Na-HCO_3^-$ (سدیم - بی‌کربنات)، $Na-SO_4^{2-}$ (سدیم-سولفات). برای اساس چشمه‌های مشکین‌شهر بیش‌تر در محدوده‌ی آب‌های دارای ترکیب سدیم - کلرید، سدیم-بی‌کربنات و سدیم-سولفات قرار می‌گیرند و سیالات چاه‌های اکتشافی در محدوده‌ی سدیم-کلرید قرار گرفته‌اند.

محتوی Cl^- - SO_4^{2-} - HCO_3^-



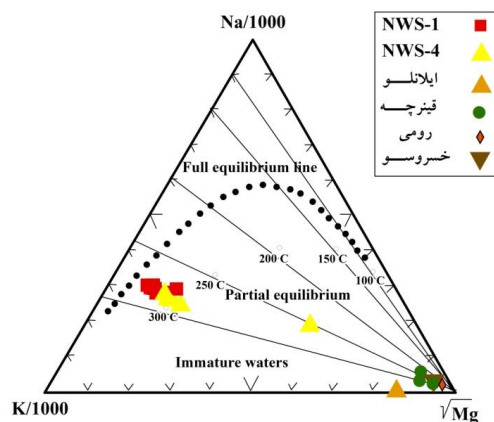
شکل ۵ (الف) - نمودار $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ و (ب) Ca-Mg-Na+K بر اساس داده‌های جدول ۱ برای رخساره گرمایی گروه مشکین‌شهر و سیالات چاه‌های اکتشافی شمال غرب سبلان.

محتوی Na-K-Mg

سطحی به تعادل یا باز تعادل رسیده‌اند. معمولاً یون‌های Na و K خیلی پایداری در حالی که Mg به راحتی تحت تأثیر دماهای پایین و گاززدایی قرار می‌گیرد (گیگنباخ، ۱۹۹۸، فوریر، ۱۹۸۱). نسبت بالای غلظت Mg در این آب‌ها (آب‌های پلات شده در گوشه Mg) نشان می‌دهد که این آب‌ها آب‌هایی هستند که با سنگ میزبان در تعادل نیستند.

سه دلیل احتمالی می‌توان برای مجاورت و نزدیکی این آب‌ها به گوشه Mg در نظر گرفت: ۱- اختلاط آب‌های گرمایی عمیق با آب‌های متوریک سطحی (شکیری و همکاران، ۲۰۰۸). ۲- چرخش سیالات داغ در تشیکلات تبخیری و زون‌های دگرسانی (شکیری و همکاران، ۲۰۰۸). ۳- اختلاط با شورابه‌های دریایی (گیگنباخ، ۱۹۸۸).

نمودار Na-K-Mg را می‌توان برای تعیین مچوریتی آب‌ها و به دست آوردن دمای ژئوترموترهای Mg-K, Na-K به کار برد (گیگنباخ، ۱۹۹۸) همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، آب‌های مشکین‌شهر در زیر خط تعادل بخشی در محدوده آب‌های ایمچور در گوشه Mg و سیالات چاه‌ها نزدیک به خط تعادل کامل قرار گرفته‌اند. منحنی نقطه‌چین مرز جداکننده تعادل کامل از تعادل بخشی است (همان‌طور که در شکل ۵-الف) نیز مشاهده می‌شود سیالات چاه‌ها در محدوده آب‌های مچور قرار گرفته‌اند. ماهیت و ترکیب آب‌های ایمچور نشان می‌دهد که این آب‌ها احتمالاً همانند فرآیندهای پیچیده آب - کانی هستند که در سطوح مختلف بین آبخوان و قسمت‌های



شکل ۶ - نمودار Na-K-Mg بر اساس داده‌های جدول ۱ برای رخساره گرمایی گروه مشکین‌شهر و سیالات درون چاه‌های اکتشافی شمال غرب سبلان.

ژئوترموتری:

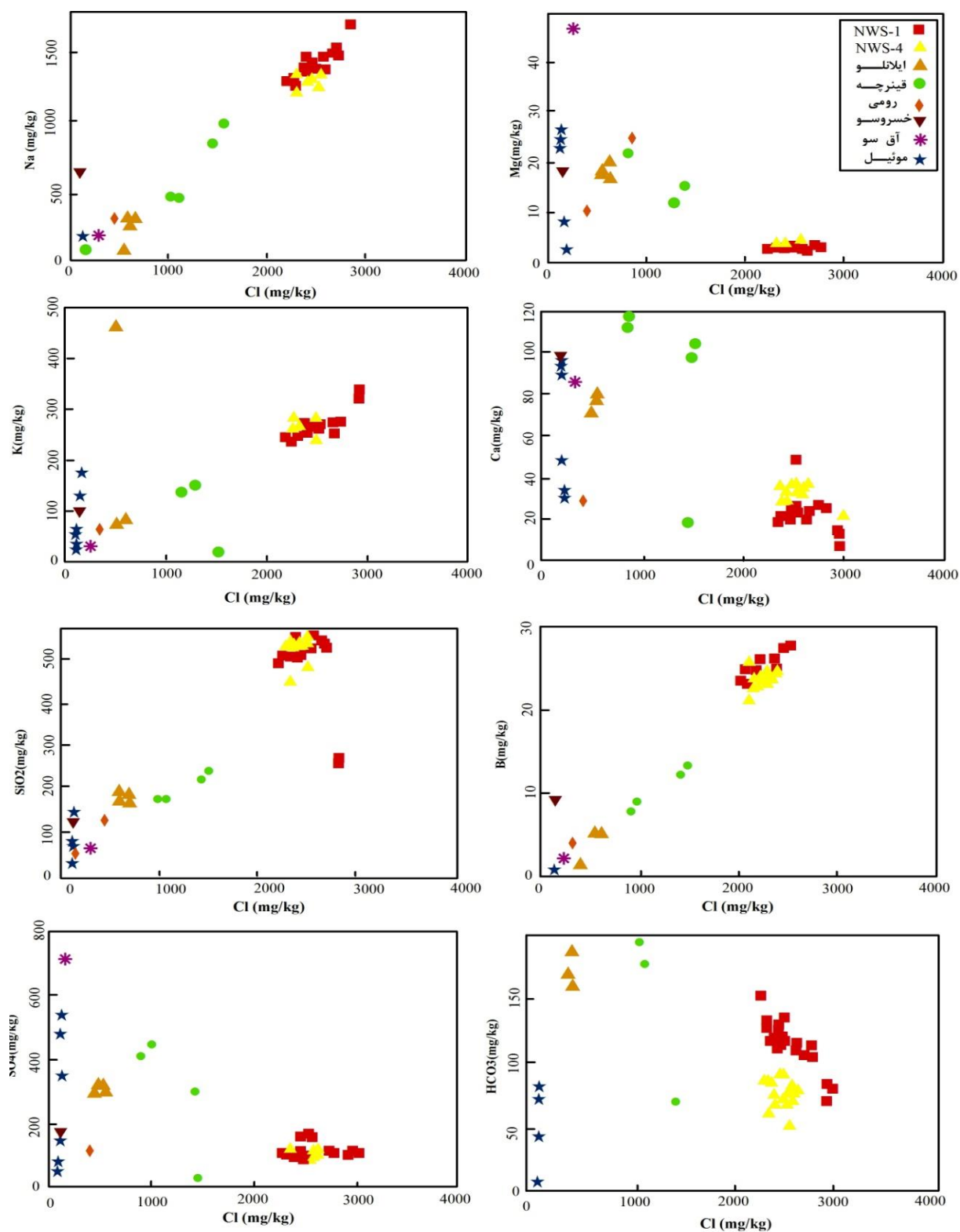
نتایج ژئوترموترهای چاه‌های اکتشافی

سه نوع اصلی از ژئوترموتر شیمیایی برای تعیین دمای آب‌های زمین گرمایی که عبارت‌اند از: ژئوترموتر Na-K، Na- و K-Ca و سیلیس بوده که در این مطالعه از روابط فورنر (۱۹۷۹) و گیگنباخ (۱۹۸۸) استفاده شده است. با توجه به تجزیه شیمیایی رخساره‌های گرمایی (جدول ۲)، مشاهده می‌شود که برخی از نمونه‌ها با هم اختلاف آشکاری دارند. این نمایانگر آن است که تداخل آب‌های زیرزمینی در سیال گرمایی ناحیه شمال غرب سبلان وجود دارد. بنابراین می‌توان چندین حالت را در تخمین دمای مخزن در نظر گرفت: اولاً تغییرات آشکار در سرعت جریان آب برخی از چشمه‌ها در فصل بهار مؤید نفوذ آب‌های سطحی و ایجاد فشار هیدروستاتیک آن در سیال گرمایی است. ثانیاً برآورد دمای مخزن عمیق زمین گرمایی با روش نسبت عناصر سدیم - پتاسیم در منطقه بیش‌تر از دمایی است که از طریق کوارتز به دست آمده است، زیرا روش کوارتز، در موقعی که اختلاط انجام گرفته باشد، دمای کم‌تر از مقدار دمای واقعی را نشان می‌دهد. بنابراین مهم‌ترین روش شیمیایی برای ترمومتری آب‌های گرمایی در این ناحیه روش Na-K است، چون این روش براساس تعیین نسبت غلظت عناصر سدیم و پتاسیم می‌باشد و تحت تأثیر اختلاط قرار نمی‌گیرد. روش Na-K-Mg به دلیل پایین بودن میزان کلسیم در آب‌های گرمایی کاربرد چندانی ندارد. در آب‌هایی که هم Ca و هم Mg بالایی دارند Na-K ژئوترموتر مناسبی نخواهد بود و بهتر است از ژئوترموترهای Na-K-Ca و K-Mg استفاده شود که به ترتیب دمای ۱۱۲ و ۱۱۷ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند.

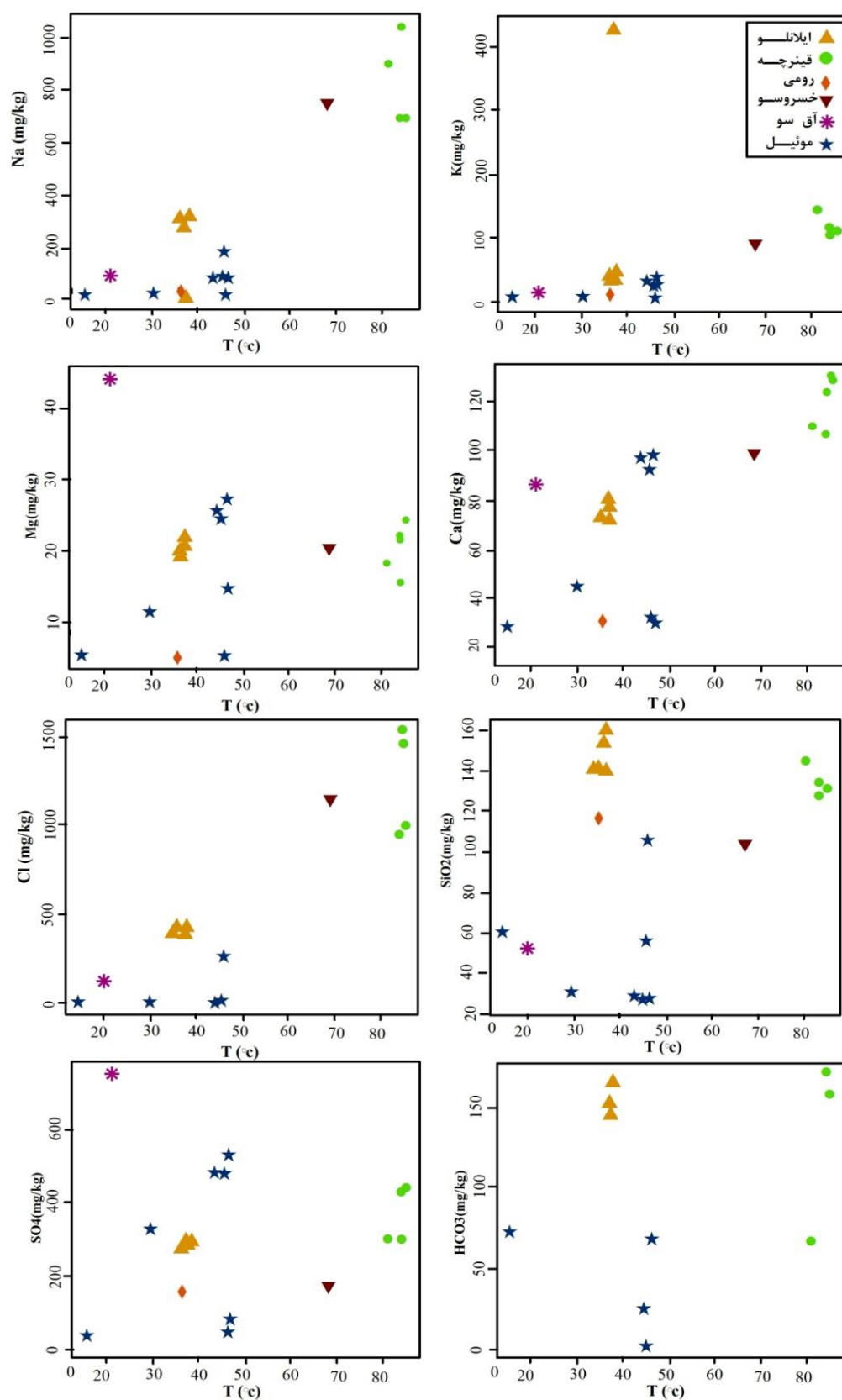
غلظت Cl بالا و غلظت نسبتاً پایین SO_4 و همچنین دمای متوسط در این آب‌ها، نشان می‌دهد که به احتمال زیاد مکانیسم بالا بودن Mg، نتیجه اختلاط آب‌های گرمایی ایمچور با آب‌های متئوریک سرد و کم‌عمق است (شکیری و همکاران، ۲۰۰۸). به علت ایمچور بودن این آب‌ها دما در مخزن ژئوترمال را نمی‌توان به طور دقیق توسط ژئوترموترهای Na-K، K-Mg و کوارتز تخمین زد. اما دمای به دست آمده توسط این ژئوترموترها برای سیالات چاه‌ها دقیق‌تر و به واقعیت نزدیک‌تر است. همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود این آب‌ها (ایمچور) دمای تقریبی در حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و سیالات چاه‌ها دمایی در حدود ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد برای مخزن ژئوترمال را نشان می‌دهند.

دی‌گرام‌های اختلاط

در شکل ۷ روابط بین SiO_2 , SO_4 , Ca, Mg, HCO_3 , K, Na و B در مقابل کلرید نشان داده شده است. B با Na, K, SiO_2 , B افزایش کلرید، افزایش می‌یابند در حالی که SO_4 , HCO_3 , Ca، Mg پراکندگی نشان می‌دهد. نمودار دما در مقابل SiO_2 , Cl، HCO_3 , SO_4 , Mg, Ca, K, Na در شکل ۸ نشان می‌دهد که Na, Ca, K, Cl رابطه‌ی تقریباً مثبت با دما دارند، در حالی که SiO_2 و Mg, HCO_3 , SO_4 پراکندگی نشان می‌دهند. همه‌ی چشمه‌های آب گرم دما بالا دارای ترکیب شیمیایی سدیم - کلرید هستند، یعنی هر قدر از میزان سدیم - کلرید کاسته شود، دمای آب نیز کاهش می‌یابد، آب‌های کلسیم - کربنات قطعاً سردتر از آب‌های کلسیم سولفات هستند. لذا ارزیابی اختلاف آب‌های گرم و سرد براساس شوری نسبت به اختلاف دما روش بهتر می‌باشد. زیرا تنوع شوری برای آب‌های سدیم - کلرید هرگز اتفاق نمی‌افتد و برعکس دما، برای همه گروه‌های شیمیایی مختلف تنوع ایجاد می‌کند.



شکل ۷- نمودار Na, K, Ca, Mg, SO₄, HCO₃, SiO₂ و B در مقابل کلرید بر اساس داده‌های جدول ۱ برای رخساره‌های گرمابی گروه مشکین‌شهر و سیالات درون چاه‌های اکتشافی شمال غرب سبلان.



شکل ۸- نمودار Cl و $\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{SO}_4, \text{HCO}_3, \text{SiO}_2$ در مقابل دما بر اساس داده‌های جدول ۱ برای رخساره‌های گرمابی گروه مشکین‌شهر و سیالات درون چاه‌های اکتشافی شمال غرب سبلان.

جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی آبهای گرمابی (چشمه‌ها) و سیالات درون چاه‌های اکتشافی.

Well	PH	Li ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ⁺² mg/l	Mg ⁺² mg/l	Fe _(total) mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	B ³⁺ mg/l	SiO ₂ mg/l
NWS-1	8.4	*	*	*	*	*	*	2900	118	77	*	*
NWS-1	8.4	10	1720	340	8	*	*	2856	111	79	*	207
NWS-1	8.5	10	1720	330	3	*	*	2845	113	70	*	202
NWS-1	8.1	9	1545	276	20	0.3	0.1	2735	120	101	24	537
NWS-1	8.2	10	1567	261	20	0.3	0.1	2724	116	95	24	543
NWS-1	8.2	9	1552	276	20	0.3	0.1	2702	122	95	24	548
NWS-1	7.9	9	1495	264	41	0.1	2.4	2517	159	117	22	522
NWS-1	8	9	1461	265	20	0.2	0.3	2483	112	114	22	527
NWS-1	8.1	9	1466	263	17	0.1	0.2	2483	123	103	22	530
NWS-1	8.3	9	1455	262	17	0.1	0.2	2519	116	105	22	527
NWS-1	8.2	9	1456	266	17	0.1	0.1	2499	114	104	22	527
NWS-1	8.2	9	1444	263	16	0.1	0.1	2470	109	101	22	537
NWS-1	8.2	9	1461	266	16	0.1	0.1	2482	110	106	22	531
NWS-1	8.8	9	1526	276	18	0.1	0.2	2606	119	100	23	559
NWS-1	8.8	9	1466	267	15	0.1	0.1	2454	117	105	22	529
NWS-1	9.2	9	1533	278	18	0.1	0.1	2482	123	102	23	556
NWS-1	8.8	9	1457	265	14	0.1	0.1	2482	120	103	22	544
NWS-1	8.8	9	1456	267	15	0.1	0	2474	110	109	23	544
NWS-1	8.8	9	1443	262	15	0.1	0	2446	119	109	22	531
NWS-1	8.8	8	1414	257	15	0.1	0.1	2411	117	105	22	520
NWS-1	8.6	8	1385	252	14	0.1	0	2384	114	115	21	522
NWS-1	8.8	9	1454	267	15	0.1	0	2606	118	103	22	535
NWS-1	8.9	8	1414	257	15	0.1	0.1	2411	117	105	22	520
NWS-1	8.7	8	1402	254	15	0.1	0.1	2375	117	113	22	519
NWS-1	8.6	8	1382	255	14	0.1	0	2336	118	130	21	506
NWS-1	8.6	8	1355	252	14	0.1	0	2384	114	115	21	522
NWS-1	8.8	8	1414	257	15	0.1	0.1	2411	117	105	22	520
NWS-1	8.9	8	1414	257	15	0.1	0.1	2411	117	105	22	520
NWS-1	8.7	8	1402	254	15	0.1	0.1	2375	117	113	22	519
NWS-1	8.6	8	1382	255	14	0.1	0	2336	118	130	21	506
NWS-4	8.4	*	*	*	*	*	*	2360	116	81		
NWS-4	8.1	*	*	*	27	*	*	2430	104	67	21	473
NWS-4	8.6	9	1465	270	26	0.2	0	2520	104	71	21	536
NWS-4	8.2	9	1439	275	26	0.2	0	2550	114	56	22	541
NWS-4	8.6	9	1440	272	28	0.3	0	2570	111	70	22	547
NWS-4	8.8	9	1419	284	29	0.3	0	2390	108	62	22	539
NWS-4	8.6	9	1414	282	26	0.2	0.1	2570	104	74	21	558
NWS-4	8.1	8	1312	261	22	0.3	1.2	2390	122	80	19	516
NWS-4	8.6	9	1432	266	28	0.3	0.1	2535	97	68	21	535
NWS-4	8.6	9	1462	274	30	0.3	0.1	2606	123	75	22	535
NWS-4	8.4	9	1382	260	29	0.3	0.1	2482	109	85	21	518
NWS-4	8.4	9	1400	261	30	0.3	0.1	2500	100	85	22	533
NWS-4	8	9	1441	270	24	0.1	0.1	2430	107	73	21	542
NWS-4	8.4	8	1350	253	26	0.9	0.1	2570	116	78	22	500

با این حال اگر نمودار Na-K-Mg در شکل را بررسی کنیم، می‌بینیم آب‌هایی که در محدوده‌ی ایمچور قرار گرفته‌اند، دور از خط تعادل کامل قرار دارند و در واقع نشان می‌دهند که این آب‌ها زمان زیادی زیر سطح نبوده‌اند (زمان ماندگاری زیادی در زیر سطح نداشته‌اند) و به احتمال زیاد در نتیجه تغلیظ شدن ماگمای اسیدی در آب‌های زیرزمینی به مرور زمان ترکیب خنثی پیدا کرده ولی هنوز به تعادل کامل نرسیده‌اند. در چشمه‌های شمال غرب ژئوترموترهای Na-K-Ca, K-Mg, Na-k و کوارتز به ترتیب دمایی است.

در حدود ۲۷۰-۱۴۰، ۲۲۰-۵۰، ۲۳۰-۳۰، ۱۶۰-۹۰ درجه سانتی-گراد نشان می‌دهد.

در سیالات چاه‌های اکتشافی NWS-4 این ژئوترموترها به ترتیب دمایی در حدود ۲۷۰-۲۹۰، ۲۳۵-۲۷۰، ۲۴۰-۲۳۰ درجه سانتی‌گراد در سیالات NWS-1 این ژئوترموترها به ترتیب دمایی در حدود ۲۷۰-۲۸۵، ۲۴۰-۲۸۰، ۲۵۰-۲۴۰، ۱۷۰-۲۴۰ درجه سانتی‌گراد است.

جدول ۲- محاسبه دما با استفاده از ژئوترموترهای Q, Na-K, Na-K-Ca, K-Mg (فورنیر، ۱۹۷۷ و گیگنباخ، ۱۹۸۸)

Locality	Name	T QF	T QG	TNaK(F)	TNaK(G)	TKMg	TNaKCa
NW Sabalan	Agsu	140	146			79	78
NW Sabalan	GHeynarge	151	159	264	276	131	227
NW Sabalan	GHeynarge	145	151	256	269	117	215
NW Sabalan	GHeynarge	145	152	260	272	117	217
NW Sabalan	GHeynarge	94	92				30
NW Sabalan	GHeynarge	147	154	226	241	125	205
NW Sabalan	Ilando	149	157			165	1181
NW Sabalan	Ilando	154	163	243	257	94	196
NW Sabalan	Ilando	156	165	249	262	90	197
NW Sabalan	Ilando	150	157	237	251	90	192
NW Sabalan	khosraw-Su	135	139	233	248	114	204
NW Sabalan	Malek-Su	135	140	279	289	92	215
NW Sabalan	Moil	78	74	364	365	82	230
NW Sabalan	Moil	81	77	364	365	81	99
NW Sabalan	Moil	110	111	*	*	60	52
NW Sabalan	Moil	107	107	*	*	58	48
NW Sabalan	Moil	79	75	351	354	78	94
NW Sabalan	Moil	83	79	*	*	65	68
NW Sabalan	Romy	104	104	242	256	54	72
NWS-1	*	*	237	274	285	263	266
NWS-1	*	*	237	274	285	263	66
NWS-1	*	*	238	274	285	265	266
NWS-1	*	*	237	276	286	269	268
NWS-1	*	*	239	274	285	268	267
NWS-1	*	*	*	*	*	*	*
NWS-1	*	172	172	283	293	*	284
NWS-1	*	171	170	280	290	*	296
NWS-1	*	234	233	273	284	242	262

NWS-1	*	235	234	273	284	244	262
NWS-1	*	236	234	272	283	244	262
NWS-1	*	*	234	271	282	265	252
NWS-1	*	*	235	274	285	250	262

جدول ۲- محاسبه دما با استفاده از ژئوترموترهای Na-K-Ca, K-Mg, Na-K, Q (فورنیر، ۱۹۷۷ و گیگنباخ، ۱۹۸۸)

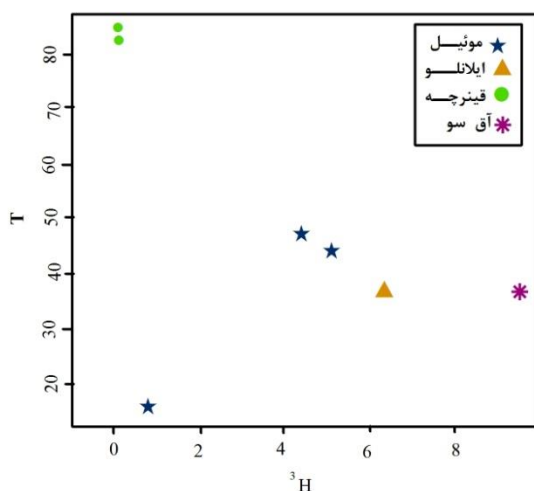
Locality	T QF	T QG	TNaK(F)	TNaK(G)	TKMg	TNaKCa
NWS-1	*	235	273	284	265	263
NWS-1	*	235	273	284	278	264
NWS-1	*	235	275	285	274	265
NWS-1	*	236	274	285	270	265
NWS-1	*	235	274	285	265	265
NWS-1	237	236	274	284	263	263
NWS-1	*	235	274	285	263	266
NWS-1	234	233	275	286	263	266
NWS-1	*	238	274	285	265	264
NWS-1	*	237	274	285	263	266
NWS-1	*	238	275	286	263	266
NWS-1	*	238	274	285	264	266
NWS-1	*	236	274	285	263	266
NWS-1	*	237	274	285	263	266
NWS-1	*	238	274	285	265	266
NWS-1	*	236	276	286	269	268
NWS-1	*	239	274	285	268	267
NWS-4	*	*	*	*	*	*
NWS-4	*	227	*	*	*	*
NWS-4	234	234	276	286	248	260
NWS-4	235	234	280	290	250	26
NWS-4	236	235	278	289	242	260
NWS-4	235	234	285	295	244	264
NWS-4	37	240	284	294	247	265
NWS-4	*	231	284	294	235	266
NWS-4	234	234	277	287	238	259
NWS-4	234	234	277	288	239	259
NWS-4	232	231	278	288	241	259
NWS-4	234	233	277	287	240	258
NWS-4	235	235	277	288	269	261
NWS-4	*	229	277	288	268	260

ایزوتوپ‌ها

لحاظ تعلق به سیستم‌های آب غالب یا بخار غالب، تخمین دمایی

یافته‌های ژئوشیمیایی شامل تعیین خواص شیمیایی که در یک عمق معین می‌توان انتظار داشت، تعیین میزان ایزوتوپ‌ها ابزارهای مفیدی برای تعیین نوع سیستم ژئوترمال به یکنواختی آب موجود، تعیین خواص شیمیایی سیالات ژئوترمال

غیرممکن است. به علاوه همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تریتیوم با دما و کلرید رابطه منفی نشان می‌دهد که حاکی از سردشدگی آب‌های گرمابی در نتیجه اختلاط با آب‌های سرد دارای تریتیوم بالا و کلرید پایین هستند. در آب‌های گروه مشکین‌شهر با مقدار قابل ملاحظه‌ای کلر، نیز بین تریتیوم و کلرید رابطه منفی حاکم است. سیالات گرمابی با مقدار تریتیوم بالا و TDS پایین (مواد جامد معلق در سیال) نشان‌دهنده اختلاط با آب‌های زیرزمینی جوان هستند.



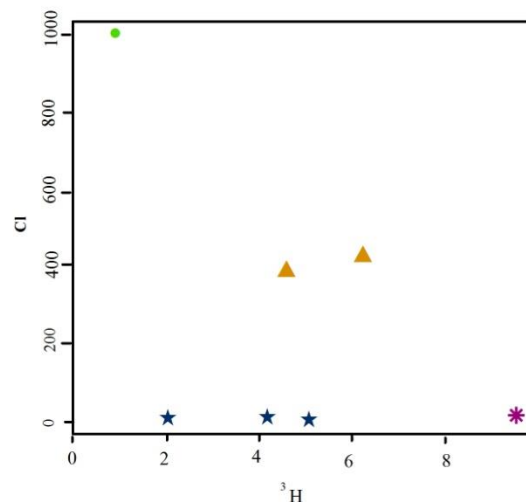
شکل ۹- نمودار کلرید و دما در مقابل تریتیوم برای چشمه‌های شمال غرب سبلان.

متئوریتی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به خط MWL در این نمونه‌ها غنی‌شدگی نسبتاً کم $\delta^{18}O$ آب - سنگ در نتیجه تغییرات اکسیژن دیده می‌شود، در حالی که مقدار δD طی این فرآیند نسبتاً ثابت باقی می‌ماند. تغییرات مثبت در δD و $\delta^{18}O$ آب‌های متئوریتی می‌تواند ناشی از مخلوط‌شدگی این آب‌ها با آب‌های ماگمایی (آندزیتی) باشد (گیگنباخ، ۱۹۹۲). آب‌هایی که به خط اختلاط ۲۰ درصد نزدیک هستند (NWS-4) دارای تغییرات اندکی هم در δD و هم در $\delta^{18}O$ هستند و احتمالاً با بخارات و آب‌های ماگما مخلوط‌شدگی اندکی نشان می‌دهند.

و همچنین ارائه‌ی منبعی برای تزریق آن‌ها پس از مصرف به اعماق هستند (کامیس و موفلر، ۱۹۷۳). در زیر به بررسی ایزوتوپ‌های آب‌های ژئوترمال می‌پردازیم.

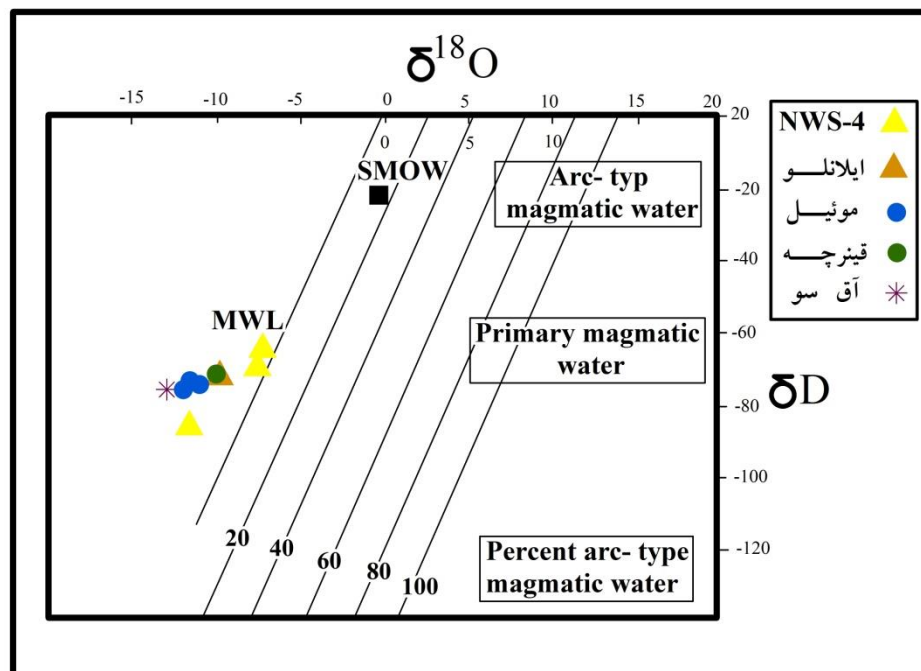
تریتیوم (3H)

تغییرات تریتیوم می‌تواند ناشی از اختلاط نسبت‌های متفاوت آب‌های سرد با آب‌های گرمابی و یا در نتیجه تغییرات زیاد در زمان ماندگاری باشد. احتمال مکانیسم دوم برای توضیح ویژگی‌های متفاوت سیالات گرمابی در یک منطقه کوچک تقریباً



ایزوتوپ‌های δD , $\delta^{18}O$

با توجه به داده‌های مربوط به آنالیز ایزوتوپی رخساره‌های گرمابی سبلان (جدول ۳) رنج δD و $\delta^{18}O$ برای چشمه‌های شمال غرب سبلان به ترتیب از -۸ تا -۱۳ و -۸۵ تا -۷۰ در هزار است. نتایج حاصل از این داده‌ها در نمودار $\delta^{18}O$ نشان داده شده است (گیگنباخ، ۱۹۷۷، a,b) خط آب‌های متئوریتی کریگ (۱۹۶۳) براساس بارش جهانی و آب‌های با منشأ ماگمایی نوع آرک جهت مقایسه در روی نمودار آورده شده است. خطوط موازی در روی نمودار درصد اختلاط آب‌های متئوریتی با آب‌های ماگمایی را نشان می‌دهد. در این نمودار (شکل ۱۰) تمامی نمونه‌ها آب‌های



شکل ۱۰- نمودار درصد تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ در مقابل δD برای نمونه‌های شمال غرب سبلان.

ایزوتوپ کربن ۱۳ ($\delta^{13}\text{C}$)

CO_2 آب‌های منطقه‌ی سبلان سنگ آهک است. در آب‌هایی که مقدار $\delta^{13}\text{C}$ بالاتر از یک یا نزدیک به یک است، احتمالاً CO_2 منشأ ماگمایی دارد که در واقع یا بیانگر وجود یک عضو انتهایی ماگمایی است یا نشان دهنده‌ی اختلاط کم CO_2 ماگمایی با CO_2 از منشأهای دیگر (مانند CO_2 اتمسفری) است. چنین حالتی احتمالاً در سیالات نزدیک به کوه سبلان که دارای غلظت CO_2 بالاتری است، نسبت به سیالاتی که دور هستند، بیش‌تر اتفاق می‌افتد.

با توجه به داده‌های $\delta^{13}\text{C}$ حاصل از آنالیز CO_2 جمع شده از سیالات منطقه (جدول ۳). به طور کلی رنج تغییرات $\delta^{13}\text{C}$ آب‌های گرمابی شمال غرب سبلان از ۱- تا ۳- متغیر در هزار است. می‌توان گفت منشأ CO_2 موجود در این آب‌ها، سنگ آهک است. در مناطق ژئوترمال جهان، جایی که منشأ CO_2 سنگ آهک نیست مقدار $\delta^{13}\text{C}$ رنجی بین ۰ تا ۷- را به خود اختصاص داده است. با این حال نمی‌توان با اطمینان گفت که منشأ

جدول ۳- نتایج آنالیز ایزوتوپی مربوط به آب‌های گرمابی (چشمه‌ها) و سیالات درون چاه.

Name	^3H TU	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^3\text{H}$ ‰	$\delta^{13}\text{C}$ ‰
Agsu	9.5	-12.8	-74.6	-1
Gheynarge	<1.1	-9.8	-7.5	-2.8
Gheynarge	0	-10.1	-72.3	-2.8
Gheynarge	*	10	*	*
Ilando	6.3	-10.2	-71.9	-3
Ilando	*	-10.3	-71.3	*
Ilando	4.6	0	*	*
Moil	<1	-11.2	-73.5	*
Moil	1.1	-11.5	-73.7	*
Moil	1	-10.9	-76.9	*

Moil	*	-12	-75.6	*
Moil	*	*	*	*
Moil	2.1	9.1	*	*
NWS-4	*	-7.65	-68	*
NWS-4	*	-7.26	-64.6	*
NWS-4	*	-11.58	-84.9	*

نتیجه‌گیری

میزان تریتیوم در این سیالات نشان‌دهنده اختلاط با آب‌های زیرزمینی جوان است. رنج δD و $\delta^{18}O$ برای چشمه‌های شمال غرب سبلان به ترتیب از ۸- تا ۱۳- و ۸۵- تا ۷۰- در هزار است. این آب‌ها در محدوده آب‌های متئوریتی قرار گرفته‌اند. با توجه به داده‌های ^{13}C حاصل از آنالیز CO_2 جمع شده از سیالات منطقه به احتمال زیاد منشأ CO_2 آب‌های منطقه سبلان سنگ آهک است.

منابع

حسن زاده، ب؛ عباس نژاد، ا.، ۱۳۹۷. فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت منابع آب زیرزمینی بخش میانی دشت نوق (غرب استان کرمان). هیدروژئولوژی، دوره ۳، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۴۶-۵۸.

سحابی، ف.، ۱۳۸۷. بررسی آتشفشان سبلان با توجه خاص بر روند تشکیل منابع زمین گرمایی مشکین‌شهر- استان اردبیل، مجله علوم زمین، پژوهشکده علوم زمین- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۳۲-۳۱.

هادیپور هفشجانی، ز؛ حمیدرضا ناصری، ح؛ علیجانی، ف.، ۱۳۹۷. فرآیندهای هیدروژئوشیمی آبخوان کوه‌دشت. هیدروژئولوژی، دوره ۳، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۴۶-۳۲.

Ahmad, M., Akram, W., Ahmad, N. 2002. Assesment of reservoir temperatures of thermal springs of the northern areas of Pakistan by chemical and isotope geothermometry. *Journal of Geothermics*. 31: 613-631.

Alavi, M., 2007. Structure of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Sciences*. 307: 1064 – 1095.

Arnosson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsoon, H. 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochim. Journal of Cosmochim*. 42: 567-577.

Arnorsson, S. 1985. The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 23: 299-335.

منبع زمین گرمایی شمال غرب سبلان به علت: ۱- قرار داشتن در محدوده‌ی آتشفشان‌های فعال عهد حاضر ۲- وجود منبع گرمایی در عمق چند هزار متری ۳- دارا بودن دمای مخزن بالای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد (تقریباً ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد) ۴- تزریق ماگما به زیر لایه‌های زیر مخزن در دسته سیستم‌های زمین‌گرمایی همرفتی دارای آنتالپی زیاد که از لحاظ فاز مایع نسبت به فاز بخار غالب است، قرار می‌گیرد. از لحاظ ترکیب چشمه‌های مشکین‌شهر بیش‌تر در محدوده آب‌های دارای ترکیب سدیم - کلرید، سدیم - بی‌کربنات و سدیم - سولفات قرار می‌گیرند و سیالات چاه‌های اکتشافی در محدوده سدیم - کلرید قرار می‌گیرند. آب‌های مشکین‌شهر در زیر خط تعادل بخشی در محدوده آب‌های ایمچور در گوشه و سیالات چاه‌ها نزدیک به خط تعادل کامل قرار گرفته‌اند. آب‌ها (ایمچور) دمای تقریبی در حدود ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و سیالات چاه‌ها دمای در حدود ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد برای مخزن ژئوترمال را نشان می‌دهند. با توجه به لیتولوژی منطقه مهم‌ترین روش شیمیایی برای ترمومتری آب‌های گرمایی در این ناحیه روش Na-K است. در چشمه‌های شمال غرب ژئوترموترهای Na-K، K-Mg، Na-K-Ca و کوارتز به ترتیب دمای در حدود ۲۷۰-۱۴۰، ۲۲۰-۵۰، ۲۳۰-۳۰، ۱۶۰-۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نشان می‌دهند. در سیالات چاه‌های اکتشافی NWS-4 این ژئوترموترها به ترتیب دمای در حدود ۲۹۰-۲۷۰، ۲۳۵-۲۷۰، ۲۷۰-۲۵۵، ۲۴۰-۲۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نشان می‌دهند و در سیالات NWS-1 این ژئوترموترها به ترتیب دمای در حدود ۲۸۵-۲۷۰، ۲۸۰-۲۴۰، ۲۷۰-۲۵۰، ۲۴۰-۱۷۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

- Giggenbach, W., 1997b. The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems, In: Barnes, H.L. (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 3rd ed. Wiley, New York, NY, pp. 737–796.
- Kharaka, Y.K., Lico, M.S., Law, L.M. 1982. Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 66: 588- 597.
- KML(Kingeston Morrison Ltd). 1999. Final report on detailed geological mapping ,assessment and targeting of exploration drilling area, NW. Sabalan.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H. and Tanaka, T. 2008. GIS integration model for geothermal exploration and well siting. *Journal of Geothermics*. 37: 107-131.
- Saffarzadeh, A., Noorollahi, Y. 2005. Geothermal development in Iran: A country update. *Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey*, 24-29 April.
- Shakeri, A., Moore, F., Kompani-Zare., 2008. Geochemistry of the thermal springs of Mount Taftan, southeastern Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 33: 829-836.
- Talebi, B., Rezvani, M. 2005. An analysis of well measurements from the Sabalan geothermal area, NW Iran. *Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey*, 24-29 April.
- Porkhial, S., Rigor, D.M., Bayrante, L.F., Layugan, D.B. 2010a. Magnetotelluric survey of NW Sabalan geothermal project, Iran. *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*. 25-29 April.
- Porkhial, S., Ghomshei, M.M., Yousefi, P. 2010b. Stable Isotope and Elemental Chemistry of Mt. Sabalan Geothermal Field, Ardebil Province of North West Iran, *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*. 25-29 April.
- Yousefi, H., Noorollahi, Y., Ehara, S., Itoi, R., Yousefi, A. 2010. Developing the geothermal resources map of Iran. *Journal of Geothermics*. 39: 140-151.
- Yousefi, H., Ehara, S., Noorollahi, Y. 2007. Geothermal potential site selection using GIS in Iran. *Proceeding of 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, USA, January 22-24*: 174-182.
- Bogie, I., Cartwright, A.J., Khosrawi, K., Talebi, B. and Sahabi, F. 2000. The Meshkin Shahr geothermal prospect, Iran. *Proceedings, World Geothermal Congress*. 1: 997-1002.
- Bromley, C., Khosrawi, K., Talebi, B. 2000. Geophysical exploration of Sabalan geothermal prospects in Iran. *Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28- June 10*.
- Combs, j. and Muffler, L. 1973. Exploration for geothermal resources, in: kruger, p. and Otte., eds., *Geothermal Energy*, Stanford University press, Standard, pp.128-95.
- Fouillac, C., Michard, G. 1981. Sodium/lithium ratios in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Journal of Geothermics*. 10: 55–70.
- Fournier, R. O. and Truesdell, A. H. 1973. An empirical Na-K- Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Journal of cosmochim*. 37: 1255 - 1276.
- Giggenbach, W. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geoindicators. *Geochim. Journal of Cosmochim*. 52: 2749–2756.
- Giggenbach, W.F. 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development (Co-ordinator D'Amore, F.)*. UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Rome. 119–144.
- Giggenbach, W., 1992. Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Journal of Earth Planet Science*. 113: 495–510.
- Masoumi, R., Calagari, A.A., Siahcheshm, K., Porkhial, S., Pichler, T. 2017. Consideration of geological aspects and geochemical parameters of fluids in Bushdi geothermal field, south of mount Sabalan, NW Iran. *Journal of African Earth Sciences*. 129: 692-700.
- Masoumi, R., Calagari, A., Siahcheshm, K., Porkhial, S. 2016. Hydrogeochemistry and origin of hydrothermal fluids on the basis of isotopic data in Sabalan geothermal system. *Quaternary journal of Iran*. 2: 183-196.
- Giggenbach, W. 1997a. The origin and evolution of fluids in magmatic–hydrothermal systems, In: Barnes, H.L. (Ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 3rd Edition. John Wiley and Sons, Inc, New York, NY, pp. 737–796.