

منشأ و تکامل هیدروژنوشیمیایی چشمه‌های تراورتن‌ساز آذرشهر، شمال غرب ایران

بهنام ابراهیم‌زاده؛ دانشجوی کارشناسی‌ارشد زمین‌شیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

مهدی جعفرزاده*؛ استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

رحیم باقری؛ دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۲

چکیده

تراورتن‌ها منطقه وسیعی در جنوب غرب آذرشهر (استان آذربایجان شرقی) را پوشش می‌دهند. در قسمت‌هایی نیز در حال حاضر چشمه‌هایی فعال در حال ته‌نشست تراورتن هستند. در این مطالعه ۱۶ نمونه آب از ۹ چشمه تراورتن‌ساز و ۷ چشمه غیر تراورتن‌ساز در منطقه آذرشهر جهت تعیین غلظت یون‌های اصلی، با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی یونی، آنالیز شد. تعداد ۶ نمونه آب از چشمه‌های منطقه نیز به منظور تعیین غلظت فلزات سنگین و ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم انتخاب شدند. داده‌های هیدروژنوشیمیایی و ایزوتوپی به دست آمده در این تحقیق جهت تعیین خصوصیات هیدروشیمیایی، منشأ مواد محلول، منشأ آب چشمه‌ها، تیپ آب چشمه‌ها، اختلاط آب چشمه‌ها، و غلظت فلزات سنگین در آب چشمه‌های تراورتن‌ساز و غیر تراورتن‌ساز مورد استفاده قرار گرفت. مطالعات هیدروشیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه نشان داد، از لحاظ اسیدیته، آب چشمه‌ها در حد خنثی، مقدار EC آن‌ها بالاتر از حد استاندارد شرب، و تیپ آب چشمه‌های تراورتن‌ساز منطقه بی‌کربناته است. همچنین، نتایج این مطالعه نشان داد منشأ یون‌های اصلی موجود در آب چشمه‌ها نیز انحلال کربنات‌ها و تا حدودی تبخیری‌هاست. مطالعات ایزوتوپی چشمه‌ها نشان‌دهنده منشأ اولیه جوی است و همچنین نشان می‌دهد عمق چرخش آب در چشمه‌های تراورتن‌ساز قزل‌داغ و تاپتاپان بسیار زیاد است و ارتفاع منطقه تغذیه بالاتری نسبت به دیگر چشمه‌ها دارند.

کلیدواژگان: آذرشهر، تراورتن، چشمه، ژئوشیمی، هیدروژنوشیمی.

مقدمه

آب چشمه‌های معدنی و تراورتن‌ساز غالباً پس از طی مراحل از لایه‌های مختلف زمین عبور می‌کند و از محلی به نام مظهر چشمه به خارج جریان می‌یابد. آب‌های تراورتن‌ساز دارای سه منشأ سطحی و عمقی و مخلوط‌اند. آب‌های با منشأ سطحی، که به آب‌های ژئوترمال معروف‌اند، منشأ خارجی دارند و از فرورفتن آب به عمق زمین و گاهی تا اعماق زیاد به وجود می‌آیند. وجود کوه‌های فراوان، چین‌خوردگی‌ها، و به‌خصوص شکستگی‌ها و گسل‌ها از عوامل مهم خروج آب چشمه‌های معدنی تراورتن‌ساز هستند (جونز^۱ و رنات^۲، ۲۰۱۰). آب‌های جوی از بین طبقات سنگ‌های کربناتی، به‌ویژه آهک، عبور می‌کنند و به دلیل اسیدی بودن کربنات کلسیم موجود در این سنگ‌ها را حل و به صورت محلول کربناتی و بی‌کربناتی با خود به سطح زمین منتقل می‌کنند. در سطح زمین به دلیل افت فشار، کاهش درجه حرارت، آزاد شدن دی‌اکسیدکربن، و تبخیر بلورهای کلسیت تشکیل می‌شوند و تراورتن را به وجود می‌آورند. یکی از سؤالات اصلی درباره

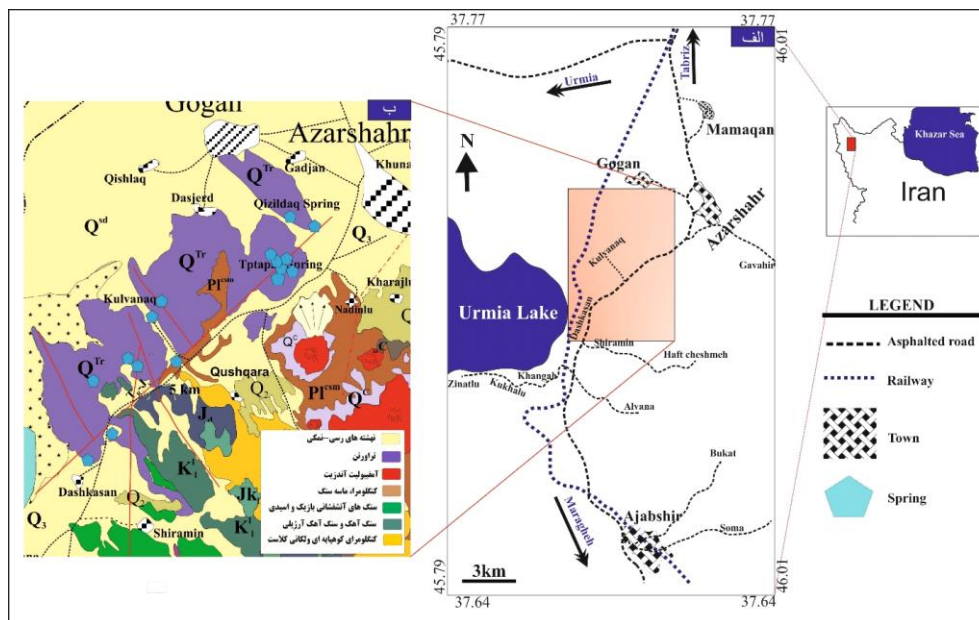
چشمه‌های تراورتن‌ساز منشأ آن‌هاست و همچنین فرایندهای ثانویه‌ای که در طول مسیر جریان باعث تغییر ترکیب آن‌ها می‌شود. برای بررسی منشأ و تکامل ژئوشیمیایی چشمه‌ها از نسبت‌های یونی مختلف- همچون Na/Cl , Br/Cl , I/Cl - و همچنین نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و دوتریم استفاده می‌شود (باقری^۱ و همکاران ۲۰۱۴؛ لیو^۲ و همکاران ۲۰۲۰؛ محمدی^۳ و همکاران ۲۰۲۰). بنابراین خصوصیات هیدروشیمیایی و ایزوتوپی آب چشمه‌ها به منظور تعیین منشأ، محل‌های تغذیه، تخلیه، طول مسیر جریان، حوضه آبریز، بررسی اختلاط بین آب‌ها، تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت آب زیرزمینی و همچنین در چشمه‌های تراورتن‌ساز جهت تعیین مسیر جریان و شرایط رسوب‌گذاری کاربرد دارند (جونز و رنات ۲۰۱۰؛ باقری و همکاران ۲۰۱۴؛ محمدی و همکاران ۲۰۲۰). با توجه به اینکه چشمه‌های تراورتن‌ساز مقادیری گاز CO_2 و احتمالاً سیستم گردش عمیق‌تر آب زیرزمینی دارند، باید ارتفاع منطقه تغذیه آن‌ها بالاتر باشد. بنابراین چشمه‌های تراورتن‌ساز نسبت به دیگر چشمه‌ها ارتفاع منطقه تغذیه بالاتر دارند. همچنین، وجود گاز CO_2 باعث کاهش غلظت ایزوتوپی در آب چشمه‌های تراورتن‌ساز می‌شود. بنابراین، چشمه‌های تراورتن‌ساز نسبت به چشمه‌های غیرتراورتن‌ساز ایزوتوپ سبک‌تری دارند. گفتنی است نوع تغذیه آبخوان نیز می‌تواند مقادیر ایزوتوپی را تغییر دهد. به طور کلی، هر چه ارتفاع بیشتر باشد، سیستم بارش بیشتر به صورت برف خواهد بود و با توجه به سبک‌تر بودن ایزوتوپ در برف طبیعتاً ایزوتوپ چشمه‌های تراورتن‌ساز کاهش می‌یابد. از جمله عوامل مؤثر بر ژئوشیمی آب چشمه‌ها می‌توان به ترکیب آب تغذیه‌کننده، کانی‌شناسی، واکنش‌پذیری واحدهای سنگ بستر چشمه‌ها و آبخوان، فعالیت‌های انسان‌زاد و زمین‌زاد و همچنین پارامترهای زیست‌محیطی که منجر به تحرک ژئوشیمیایی ترکیبات خاص می‌شود اشاره کرد (وانگ^۴ و همکاران ۲۰۱۱). شاخص‌های هیدروژئوشیمیایی می‌توانند برای مطالعه روند تکامل انحلال مواد معدنی و رسوبات نیز استفاده شوند (کاپاسو^۵ و همکاران ۲۰۰۱؛ ماری^۶ و ونگوش ۲۰۰۱). برای ارزیابی منشأ آب چشمه‌های مختلف، می‌توان از داده‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپ‌های پایدار استفاده کرد (باقری و همکاران ۲۰۱۴). در این مطالعه، منشأ آب و تکامل ژئوشیمیایی چشمه‌های تراورتن‌ساز و غیرتراورتن‌ساز منطقه آذرشهر با استفاده از داده‌های هیدروژئوشیمیایی، ایزوتوپی، و غلظت فلزات سنگین بررسی شد. موقعیت چشمه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ ب ارائه شده است.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در شمال غرب ایران و در جنوب آذرشهر قرار دارد. مختصات جغرافیایی منطقه $35^{\circ} 30'$ تا $46^{\circ} 00'$ طول شرقی و $37^{\circ} 30'$ تا $38^{\circ} 00'$ عرض شمالی است که از طرف غرب به دریاچه ارومیه و از شرق به کوه سهند محدود می‌شود (شکل ۱ الف). از لحاظ ساختاری، این منطقه بین دو کمر بند تراستی قفقاز در شمال و زاگرس در جنوب قرار گرفته است (جکسون^۷ ۱۹۹۲). نهشته‌های تراورتن آذرشهر روی واحدهای پی‌سنگی به سن نئوژن قرار دارد. فرایند

1. Bagheri
2. Liu
3. Mohammadi
4. Wang
5. Capasso
6. Marie
7. Jackson

رسوب‌گذاری تراورتن هم‌اکنون نیز به طور محدود در تعدادی از چشمه‌های فعال، از جمله چشمه‌های تاپتاپان، قزل‌داغ، کلوانق، داشکسن ادامه دارد. از لحاظ چینه‌شناسی، منطقه آذرشهر شامل واحدهای گوناگون با ترکیب و سن متنوع از پالئوزوئیک تا کواترنری است. رخنمون‌های پالئوزوئیک در منطقه آذرشهر به سن کامبرین هستند. ماسه‌سنگ و شیل‌های سازند شمشک در شرق روستای کلوانق در سمت شرق جاده تبریز- مراغه رخنمون‌هایی دارد. سازند دلیچای با لیتولوژی سنگ‌آهک‌های آرژیلی و ماسه‌ای در بخش‌های شمال شرقی منطقه آذرشهر و آهک‌های ضخیم‌لایه تا توده‌ای بیتومینوس سازند تیزکوه به سن کرتاسه در بخش‌های جنوب غربی آذرشهر رخنمون‌های محدودی را نشان می‌دهند (قدیرزاده^۱ ۲۰۰۳). نهشته‌های آذرآواری سه‌پند، خاکسترهای آتشفشانی همراه با سنگ‌های آذرآواری، کنگلومرا، ماسه‌سنگ و شیل، آندزیت، داسیت و برش ولکانیکی، داسیت و سنگ‌های فلسیک همراه آن، تراورتن، پادگانه‌های آبرفتی جوان، و باتلاق‌های نمکی نیز نهشته‌های سنوزوئیک منطقه آذرشهر را تشکیل می‌دهند (قدیرزاده ۲۰۰۳).



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن؛ ب) نقشه زمین‌شناسی و موقعیت چشمه‌های مورد مطالعه

روش مطالعه

در مجموع ۱۶ نمونه آب از ۹ چشمه تراورتن‌ساز و ۷ چشمه غیرتراورتن‌ساز منطقه آذرشهر جهت تعیین غلظت یون‌های اصلی گرفته شد و با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی یونی آنالیز شد. ۶ نمونه آب از چشمه‌های منطقه نیز به منظور تعیین غلظت فلزات سنگین انتخاب شد. به منظور مقایسه و تعیین منشأ و همچنین بررسی پدیده‌های مختلف ژئوشیمیایی، نمونه‌برداری از چشمه غیرتراورتن‌ساز نیز نیاز است که در این تحقیق با توجه به موقعیت چشمه‌ها و نزدیکی

به چشمه‌های تراورتن ساز و همچنین محل تخلیه از یک منطقه از نظر زمین‌شناسی و همچنین در نظر گرفتن مقدار دبی و هدایت الکتریکی آن‌ها چند نمونه غیر تراورتن ساز انتخاب و نمونه‌برداری شد. قبل از نمونه‌برداری، بطری‌ها با آب مقطر شسته شدند. نمونه‌های آب جهت آنالیز یون‌های اصلی در بطری‌های ۱/۵ لیتری قرار گرفتند و در یک مکان تاریک با دمای حدود ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری و سپس بلافاصله به آزمایشگاه انتقال داده شدند. یون‌های اصلی در آزمایشگاه آب‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود توسط دستگاه کروماتوگرافی یونی آنالیز شدند. برای نمونه‌برداری جهت آنالیز غلظت فلزات سنگین، نمونه‌ها ابتدا توسط فیلتر ۰/۴۵ میکرومتر فیلتر شدند و سپس جهت جلوگیری از واکنش‌ها و رسوب فلزات چند قطره اسید کلریدریک ۰/۲ نرمال به هر نمونه اضافه شد تا pH نمونه‌ها به کمتر از ۲ برسد. با این عمل غلظت اولیه فلزات سنگین در نمونه‌ها تثبیت می‌شود و در طول ارسال به آزمایشگاه غلظت آن‌ها تغییر نمی‌کند. این فرایندها حتماً برای نمونه‌برداری فلزات سنگین باید رعایت شود تا از ایجاد خطا جلوگیری شود. سپس، نمونه‌ها توسط دستگاه ICPMS آنالیز شدند. هدایت الکتریکی EC و pH چشمه‌ها در محل توسط دستگاه قابل حمل (-WP-84 conductivity) (salinity EC meter TPS company, Australia) و AZ8601 pH/mV meter اندازه‌گیری شد. شاخص اشباع‌شدگی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC (پارخورست^۱ و آپلو^{۲۰۱۳}) محاسبه شد. تکامل ژئوشیمیایی آب چشمه‌های منطقه نیز با استفاده از انواع نمودارهای ترکیبی بررسی شد. مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ (O^{18}) و دوتریم (H^2) موجود در ۶ نمونه آب چشمه‌ها به روش LGR اندازه‌گیری شد. استاندارد که برای سنجش نسبت‌های ایزوتوپی به کار می‌رود SMOW (استاندارد متوسط آب اقیانوس) است. خصوصیات فیزیکوشیمیایی و نتایج ایزوتوپی و فلزات سنگین چشمه‌های مورد مطالعه در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه‌های تراورتن ساز و غیر تراورتن ساز منطقه آذرشهر

Springs Name	Code	Elevat ion (m)	T (°C)	pH	Q (Lit/s)	EC (μ S/cm)	Eh (mV)	TDS (ppm)
چشمه تاپتاپان	SP1	۱۴۳۰	۲۱	۶٫۰۷	۴	۳۸۲۰	۷۴	۲۴۰۶
چشمه فرعی نزدیک تاپتاپان	SP2	۱۴۳۰	۲۲	۶٫۱۱	۰٫۵	۳۸۵۰	۷۲	۲۴۲۵
چشمه فرعی نزدیک تاپتاپان	SP3	۱۴۴۰	۱۵	۶٫۱۲	۰٫۲	۳۳۹۰	۷۲	۲۱۳۵
چشمه فرعی نزدیک تاپتاپان	SP4	۱۴۳۰	۱۵	۶٫۰۳	۰٫۳	۳۹۱۰	۷۵	۲۴۶۳
چشمه غیر تراورتن ساز	SP5	۱۴۱۰	۱۷	۷٫۴	۰٫۱	۲۹۶۵	۹	۱۸۶۷
چشمه فرعی نزدیک تاپتاپان	SP6	۱۴۲۰	۱۵	۵٫۸۱	۰٫۱	۴۰۱۰	۸۴	۲۵۲۶
چشمه غیر تراورتن ساز	SP7	۱۳۴۰	۱۱	۷٫۲۶	۰٫۵	۲۲۷۰	۱۷	۱۴۳۰
چشمه قزل داغ	SP8	۱۴۰۰	۲۶	۶٫۲۹	۲	۴۵۳۰	۶۴	۲۸۵۳
چشمه غیر تراورتن ساز	SP9	۱۳۹۰	۱۷	۵٫۸۹	۱	۳۵۰۰	۸۱	۲۲۰۵
چشمه غیر تراورتن ساز	SP10	۱۴۰۵	۱۶	۶٫۸	۰٫۲	۱۹۱۸	۴۳	۱۲۰۸٫۳۴
چشمه کلوانق	SP12	۱۴۵۰	۱۸	۶٫۲۳	۱۰	۳۸۴۰	۶۷	۲۴۱۹٫۲
چشمه غیر تراورتن ساز	SP13	۱۴۱۰	۱۴	۵٫۲۷	۰٫۵	۲۵۹۰	۱۰۸	۱۶۳۱٫۷
چشمه غیر تراورتن ساز	SP14	۱۴۰۰	۱۲	۶٫۴۶	۱	۲۵۵۰	۵۸	۱۶۰۵٫۵

Springs Name	Code	Elevation (m)	T (°C)	pH	Q (Lit/s)	EC (μS/cm)	Eh (mV)	TDS (ppm)
چشمه غیرتراورتن‌ساز	SP15	۱۳۹۰	۱۴	۶٫۱	۵	۴۴۲۰	۷۲	۲۷۸۴٫۶
چشمه غیرتراورتن‌ساز	SP16	۱۴۰۰	۱۵	۵٫۸۸	۲	۲۳۹۰	۸۲	۱۵۰۷٫۷
چشمه نزدیک کلوانق	SP17	۱۴۵۰	۲۰	۶٫۰۶	۴	۳۸۲۰	۷۴	۲۴۰۶٫۶

جدول ۲. ترکیب هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های تراورتن‌ساز و غیرتراورتن‌ساز منطقه آذرشهر (غلظت بر حسب ppm)

Sample	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	Rb	Li	Cs	As	Sr	Si	Li/Cs	Rb/Cs	Na/Cl	Na/K	%O ³⁺	%OH ⁻
SP1	۳۰۴	۱۳۵	۲۷۵	۲۲	۲۸۷	۳۴۶	۲۵۹۳	۰٫۰۸	۰٫۵	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۲	۱۷	۲۲	۴	۱٫۴۷	۱۱	۱۰٫۴	۶۷٫۸
SP2	۳۴۰	۲۰۶	۱۲۷	۲۵	۲۸۷	۳۹۴	۲۲۴۲	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۶۸	۸	-	-
SP3	۳۰۰	۱۵۷	۱۱۲	۲۶	۲۷۶	۳۷۷	۲۲۶۹	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۷۳	۸	-	-
SP4	۳۴۰	۲۰۶	۱۱۹	۲۲	۲۴۴	۳۴۱	۲۶۶۶	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۷۵	۹	-	-
SP5 *	۱۴۰	۱۴۵	۲۰۰	۳۹	۵۲۸	۷۲۱	۷۸۱	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۵۸	۹	-	-
SP6	۴۴۰	۱۸۲	۱۱۴	۱۷	۶۰۶	۲۸۴	۲۶۶۵	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۳۱	۱۲	-	-
SP7 *	۳۴۷	۵۹	۲۴۷	۱۴	۳۲۲	۷۳۵	۴۸۸	۰٫۱	۰٫۱	-	۰٫۱	۲٫۲	۳۱	۲۲۷	۳۰	۱٫۱	۳۰	۸٫۳۷	۵۲٫۱
SP8	۲۶۱	۱۴۹	۵۶۴	۹۰	۴۵۷	۵۵۶	۳۰۰۲	۰٫۱۵	۱٫۱	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۲٫۳	۹	۲۷	۳	۱٫۹	۱۰	۱۰٫۲	۷۱٫۰
SP9 *	۸۶۱	۱۴۵	۱۰۶	۲۳	۹۵	۳۱۷	۲۶۳۵	-	-	-	-	-	-	-	-	۱٫۷	۷	-	-
SP1 #0	۲۲۰	۷۲	۱۱۶	۲۲	۱۲۷	۲۵۹	۸۷۲	-	-	-	-	-	-	-	-	۱٫۴	۹	-	-
SP1 2	۲۷۵	۱۳۴	۳۸۲	۶۱	۳۳۷	۴۲۸	۳۳۴۹	۰٫۱۲	۱	۰٫۰۳	۰٫۱۵	۲٫۳	۱۱	۳۵	۴	۲٫۴	۱۰	۹٫۸۵	۶۵٫۲
SP1 #3	۴۰۰	۶۹	۳۱۳	۱۴	۳۷۵	۴۹۹	۷۸۱	۰٫۰۶	۰٫۱	-	۰٫۰۱	۲٫۲	۵۴	۴۰۰	۲۵۲	۱٫۲	۳۸	۸٫۰۲	۶۱٫۰
SP1 #4	۲۲۰	۱۵۷	۱۱۷	۱۰	۲۴۸	۲۳۰	۱۳۱۷	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۷۹	۲۱	-	-
SP1 #5	۳۰۰	۷۲	۲۲۰	۴۵	۳۵۸	۵۱۱	۲۶۵۴	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۹۴	۸	-	-
SP1 #6	۴۳۳	۷۷	۲۲۷	۱۵	۱۹۴	۲۶۴	۱۲۰۸	۰٫۰۳	۰٫۲	-	۰٫۴۰	۱٫۴	۱۶	۳۰	۴	۱٫۸	۲۵	۹٫۰۷	۶۱٫۴
SP1 7	۳۸۰	۱۷۰	۱۶۳	۲۸	۲۸۰	۴۴۰	۳۰۶۹	-	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۸	۱۰	-	-

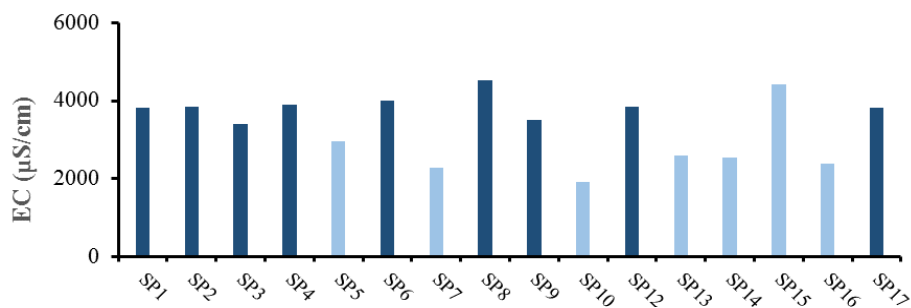
* چشمه غیرتراورتن‌ساز

بحث

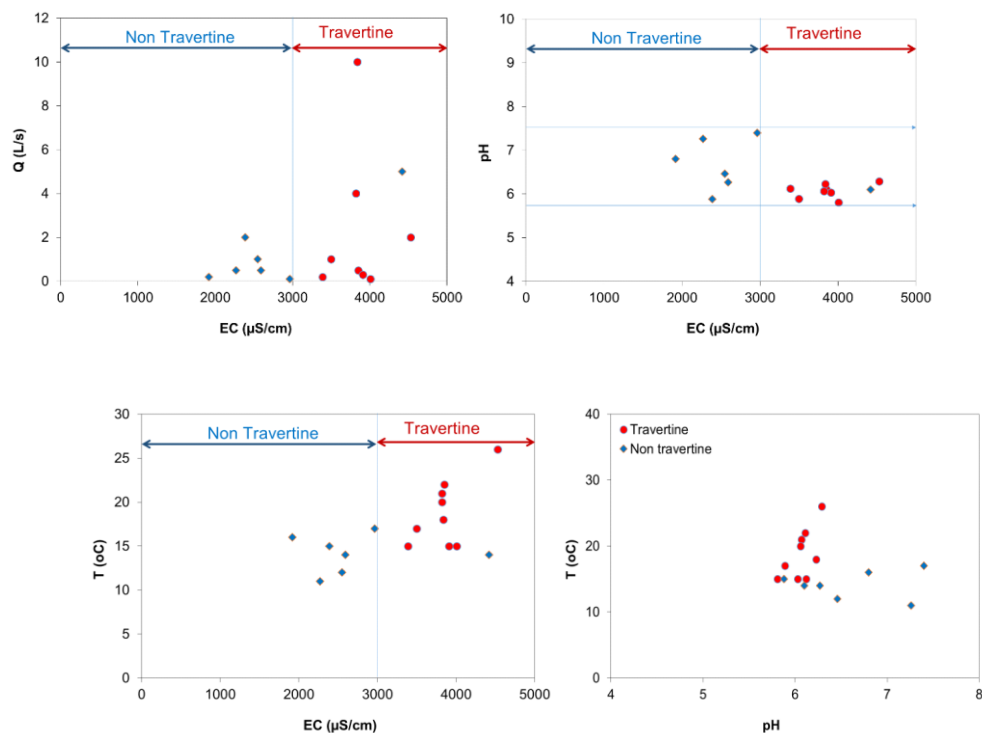
بررسی تغییرات هدایت الکتریکی (EC)

مقادیر EC رابطه مستقیمی با مقدار مجموع نمک‌های محلول در آب دارد. عوامل بسیاری روی مقدار EC تأثیر می‌گذارند که از آن جمله می‌توان به لیتولوژی آبخوان و سازندهای مجاور، زمان ماندگاری آب در آبخوان، سرعت حرکت آب زیرزمینی، مقادیر نزولات جوئی، میزان و نوع تغذیه آبخوان اشاره کرد (هانسلو^۱ ۱۹۹۵). شکل ۲ مقادیر هدایت الکتریکی نمونه‌های برداشت‌شده از چشمه‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ مقدار EC

چشمه‌ها در محدوده ۱۹۱۸ تا ۴۵۳۰ میکرو مهوس بر سانتی‌متر متغیر است. بیشترین مقدار EC مربوط به چشمه تراورتن‌ساز قزل‌داغ (SP8) و کمترین آن مربوط به چشمه غیرتراورتن‌ساز (SP10) است. مقدار EC تقریباً در همه چشمه‌ها از حد استاندارد شرب بالاتر و در محدوده لب‌شور تا شور است. با توجه به زمین‌شناسی منطقه آذرشهر، افزایش مقدار EC در این منطقه می‌تواند به دلیل انحلال لایه‌های تبخیری یا از واحدهای شیلی مابین سازند نسن و روته باشد. در شکل ۳ رابطه بین مقدار EC با مقادیر pH و دما و دبی چشمه‌ها جهت تفکیک و تقسیم‌بندی بهتر ترسیم شده است. با توجه به رابطه بین EC با دبی چشمه‌ها، دبی چشمه‌های تراورتن‌ساز به طور میانگین بیشتر از بقیه است. با توجه به رابطه بین EC با مقدار دما، می‌توان نتیجه گرفت که متوسط دمای چشمه‌های تراورتن‌ساز به دلیل عمق چرخش زیادتر بیشتر از چشمه‌های غیرتراورتن‌ساز با منشأ کم‌عمق است.



شکل ۲. نمودار تغییرات EC در چشمه‌های منطقه آذرشهر



شکل ۳. رابطه بین مقدار EC با مقادیر pH و دما و دبی چشمه‌ها

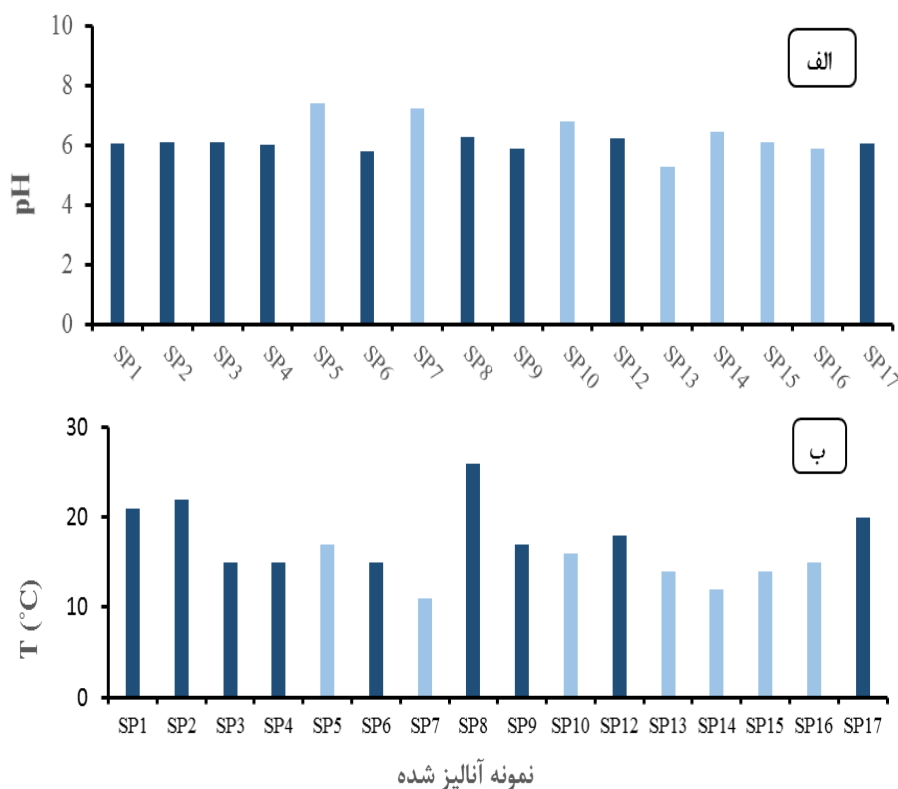
ارزيابی مقادير pH در منطقه مورد مطالعه

با توجه به شكل ۴ الف، مقادير pH آب چشمه‌های منطقه در بازه ۵/۲۷ تا ۷/۴ قرار دارد كه در اين ميان آب چشمه SP13 (۵/۲۷) كمترين ميزان pH و آب چشمه غيرتراورتن‌ساز SP5 (۷/۴) بيشترين ميزان pH را دارند. به طور متوسط مقدار pH در حدود ۶ است كه نشان مي‌دهد مقدار pH در اين منطقه همچون ديگر مناطق كارستی و تراورتنی (پنتكاست^۱ ۲۰۰۵) در حد خنثی است. تغييرات pH به طور مستقيم و غير مستقيم بر دی‌اكسيدكربن و بسياری از مواد محلول ديگر تأثير مي‌گذارد. چشمه‌هایی كه pH كمتری دارند معمولاً تراورتن‌های نوع ترموژن و چشمه‌های با pH بالا معمولاً تراورتن‌های نوع متوژن را تشكيل مي‌دهند (پنتكاست ۲۰۰۵). از نظر تغييرات pH نيز با توجه به رابطه بين EC با pH مي‌توان گفت متوسط مقدار pH در چشمه‌های تراورتن‌ساز كمتر از بقيه چشمه‌هاست كه علت آن مي‌تواند عمق چرخش بيشتر چشمه‌های تراورتن‌ساز و همچنين انحلال گاز دی‌اكسيدكربن و افزايش شاخص اشباع آن‌ها باشد. با انحلال بيشتر گاز كربنيك، مقدار pH کاهش و قدرت انحلال‌پذيري افزايش مي‌يابد. مقدار pH وابسته به دما نيز هست. با توجه به رابطه بين pH با دما در چشمه‌های تراورتن‌ساز، با افزايش دما مقدار pH نيز افزايش مي‌يابد كه امری طبيعي است. اما در چشمه‌های غيرتراورتن‌ساز با عمق چرخش كمتر و همچنين دمای كمتر رنج تغييرات pH بيشتر است. دليل اين وضعيت مي‌تواند رخداد پديده اختلاط بين تراورتن‌ساز و غيرتراورتن‌ساز در طول مسير حركت از عمق به سطح باشد. اين چشمه‌ها دمای كمتری دارند و انحلال كربنات‌ها در آن‌ها بيشتر رخ مي‌دهد كه باعث افزايش بيشتر pH مي‌شود.

بررسی تغييرات دما

از نظر درجه حرارت نيز چشمه‌های منطقه مورد مطالعه در دو گروه گرمایی و معمولی (سرد) قرار مي‌گيرند. ملاك تقسيم‌بندي بر اساس معيارهای جهانی برای چشمه‌های آب گرم به دو روش كلي است. در روش اول اگر ميانگين دمای چشمه حدود ۵ تا ۶ درجه سانتی‌گراد بيشتر از دمای متوسط ساليانه محیط باشد، در گروه چشمه‌های آب گرم قرار مي‌گيرد و در روش دوم چشمه‌هایی كه ميانگين دمای آن‌ها بيشتر از ۳۶/۷ درجه سانتی‌گراد باشد در گروه چشمه‌های آب گرم تقسيم مي‌شود (پنتكاست ۲۰۰۵). در اين مطالعه با توجه به ميانگين دمای ساليانه منطقه (C14°) و نيز ميزان بالای بارش ساليانه برای تقسيم‌بندي بهتر و تفكيك مناسب بين چشمه‌های سرد و گرم مورد بررسی دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به منزله دمای معيار در نظر گرفته شد و چشمه‌هایی كه ميانگين دمای آن‌ها بيشتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد است چشمه‌های آب گرم و چشمه‌هایی كه ميانگين دمای آن‌ها كمتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد است چشمه‌های آب سرد در نظر گرفته شدند. كمترين دمای اندازه‌گيري شده مربوط به چشمه غيرتراورتن‌ساز (SP7) با دمای ۱۱ درجه سانتی‌گراد و بيشترين دمای اندازه‌گيري شده مربوط به چشمه تراورتن‌ساز قزل‌داغ (SP8) با دمای ۲۶ درجه سانتی‌گراد بود. روند تغييرات دما برای چشمه‌های مورد مطالعه در شكل (۴ ب) نشان داده شده است. چشمه‌های (SP1, SP2, SP8, SP12, SP17) دارای آب گرم‌اند. تغييرات دمایی در منطقه روی ميزان تشكيل و انحلال كانی‌های كربناته تأثير مي‌گذارد (پنتكاست ۲۰۰۵؛ باقري و همكاران ۲۰۱۴)؛ طوری كه ميزان رسوب‌گذاري تراورتن‌ها در دهانه چشمه‌ها در طول

شبانه‌روز و با تغییر دما تفاوت می‌کند. رسوب‌گذاری کلسیت در طول روز نسبت به شب ۳۵ درصد بیشتر است (چافتز^۱ و فولک^۲ ۱۹۸۴؛ پنتکاست^۳ ۲۰۰۵). فوکه^۲ و همکاران (۲۰۰۰) نشان دادند که دمای آب روی نوع کربنات کلسیم نیز مؤثر است؛ به این ترتیب که اگر دمای آب بیش از ۴۴ درجه سانتی‌گراد باشد آراگونیت و در دمای بین ۳۰ تا ۴۳ درجه سانتی‌گراد کلسیت همراه آراگونیت و در دمای پایین‌تر از ۳۰ درجه کلسیت ته‌نشین می‌شود. دمای چشمه‌های تراورتن‌ساز آذرشهر کمتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین، کلسیت کانی غالب با بیش از ۹۵ درصد است.



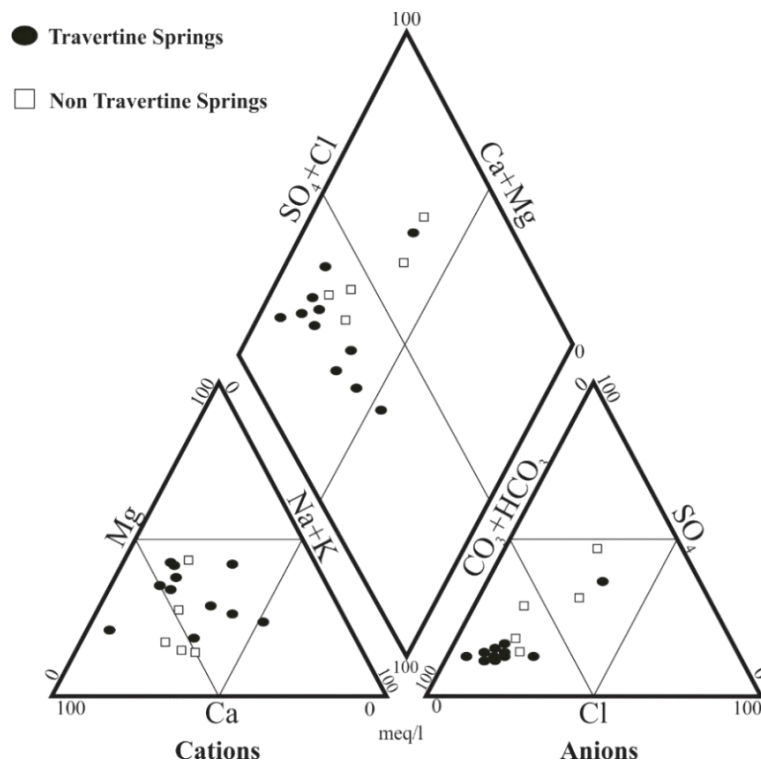
شکل ۴. الف) نمودار تغییرات pH در چشمه‌های منطقه آذرشهر؛ ب) نمودار تغییرات دما در چشمه‌های منطقه آذرشهر

تعیین تیپ و رخساره‌های ژئوشیمیایی منابع آب منطقه آذرشهر

نمودارهای مختلفی جهت تجزیه و تحلیل داده‌های هیدروژئوشیمیایی وجود دارد که در بیشتر آن‌ها از کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی استفاده می‌شود. یکی از نمودارهای متداول جهت بررسی هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی نمودار پایپر^۳ (۱۹۵۳) است. در واقع، از این نمودار برای تعیین رخساره‌های ژئوشیمیایی، مسیرهای تکامل ژئوشیمیایی در منطقه، و ارزیابی زون‌های غالب کاتیونی و آنیونی و تیپ آب استفاده می‌شود. زون‌های غالب کاتیونی و آنیونی بیان‌کننده غالب بودن اسیدهای ضعیف یا اسیدهای قوی و عناصر قلیایی یا قلیایی‌خاکی هستند. شکل ۵ نمودار پایپر نمونه‌های آب

1. Chafetz
2. Fouke
3. Piper

چشمه‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های آب مربوط به چشمه‌های SP7, SP5, SP13 قلیایی‌خاکی‌ها بیشتر از قلیایی‌ها هستند و اسیدهای قوی بیشتر از اسیدهای ضعیف‌اند. مقدار سولفات و کلرید در آن‌ها بیشتر از بی‌کربنات است. بنابراین تیپ غالب برای آب این چشمه‌ها $Cl(SO_4)-Ca(Mg)$ است. برای سایر نمونه‌ها قلیایی‌خاکی‌ها بیشتر از قلیایی‌ها و اسیدهای ضعیف بیشتر از اسیدهای قوی است. همچنین میزان بی‌کربنات بیشتر از کلر و سولفات است. بنابراین، تیپ غالب برای آب این چشمه‌ها $HCO_3-Ca(Mg)$ است. تیپ غالب در چشمه‌های منطقه در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۵. نمودار پایپر برای چشمه‌های تراورتن‌ساز و غیر تراورتن‌ساز آذرشهر

جدول ۳. تیپ غالب آب در چشمه‌های منطقه آذرشهر

Sample	SO_4-Ca	HCO_3-Ca	SO_4-Mg	$HCO_3-(Ca(Mg))$	HCO_3-Na
SP1, SP3, SP6, SP9, SP10, SP15, SP16, SP17		✓			
SP2, SP4, SP14				✓	
SP5			✓		
SP7, SP13	✓				
SP8, SP12					✓

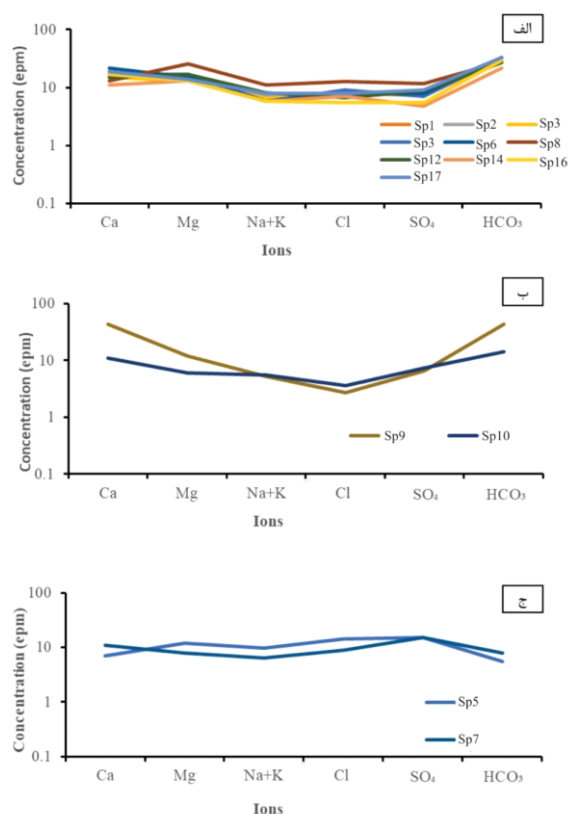
به منظور تعیین منشأ یون‌ها می‌توان از روند تغییرات یون‌های اصلی بر اساس نمودار شولر^۱ (۱۹۶۷) نیز بهره برد. با استفاده از این نمودار می‌توان نمونه‌ها را گروه‌بندی و منشأ اولیه آن‌ها و یون‌های غالب در آب را تعیین کرد. در این نمودار اگر روند تغییر یون‌ها در نمونه‌ها مشابه باشد نشان‌دهنده یکسان بودن منشأ آن‌هاست. با توجه به نمودار شولر (شکل ۶)، نمونه‌های آب منطقه در سه گروه تقسیم شدند.

۱. گروه اول شامل چشمه‌های (S2, S3, S4, S6, S14, S16, S17, S1) ($\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$, $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$)

۲. گروه دوم شامل چشمه‌های (SP10, SP9) ($\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$, $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} + \text{K}$)

۳. گروه سوم شامل چشمه‌های (SP5, SP7) ($\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$, $\text{Mg} > \text{Ca} > \text{Na} + \text{K}$)

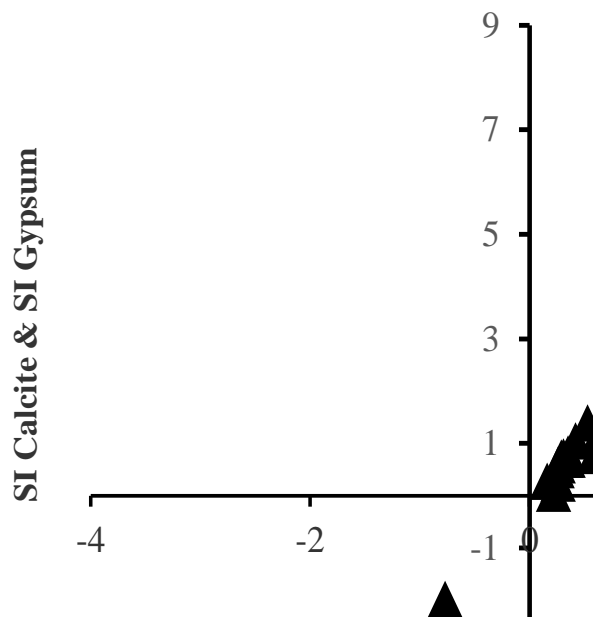
این تفاوت‌ها نشان‌دهنده منشأ متفاوت و رخداد فرایند اختلاط است. یون‌های غالب در گروه اول (شکل ۶ الف) شامل HCO_3 -Ca-Mg هستند که می‌تواند نشان‌دهنده انحلال کربنات‌ها و تا حدودی تبخیری‌ها باشد. شکل ۶ ب نمودار شولر گروه ۲ را نشان می‌دهد. این دو چشمه غیرتراورتن‌ساز هستند و تقریباً روندی مشابه دارند. بی‌کربنات و کلسیم به ترتیب آنیون و کاتیون غالب در آب این چشمه‌ها هستند. دو چشمه^۲ گروه سوم هم غیرتراورتن‌ساز هستند و روند مشابهی را نشان می‌دهند (شکل ۶ ج). این دو چشمه فصلی‌اند و دبی کمی دارند. سولفات و کلر و منیزیم در این چشمه‌ها یون‌های غالب هستند.



شکل ۶. نمودار شولر برای چشمه‌های منطقه آذرشهر

شاخص اشباع‌شدگی کانی‌های اصلی در آب چشمه‌ها

شاخص اشباع کانی‌های مختلف نشان‌دهنده میزان انحلال این کانی‌ها در محیط‌های آبی است و می‌تواند به منزله شاهدی برای توانایی این آب‌ها در انحلال کانی‌های مختلف در آب استفاده شود (باقری^۱ و همکاران ۲۰۱۷). شاخص اشباع‌شدگی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC (پارخورست و آپلو ۲۰۱۳) محاسبه و در جدول ۴ برای کانی‌های مختلف ارائه شده است. اگر شاخص اشباع‌شدگی مواد معدنی زیر ۰ باشد، محلول تحت اشباع است و مواد معدنی همچنان در حال حل شدن هستند (باقری و همکاران ۲۰۱۷). شاخص اشباع در حدود صفر نشان‌دهنده حالت اشباع است و فعالیت یونی و انحلال‌پذیری برابر است و تعادل ترمودینامیک با فاز جامد وجود دارد (گمیزی^۲ و تارکان ۲۰۰۲). آب چشمه‌های منطقه نسبت به کانی‌های کربناته مانند کلسیت، دولومیت، آراگونیت در حالت اشباع قرار دارند. نمونه‌ها نسبت به کانی‌های هالیت و ژپس و انیدریت در حالت تحت اشباع و نسبت به کانی‌های کوارتز و کلسدونی در حالت فوق‌اشباع هستند. شکل ۷ نشان می‌دهد که نمونه‌های همه چشمه‌ها، جز چشمه SPI3، که یک چشمه غیرتراورتن‌ساز است، نسبت به هالیت و ژپس مقادیر منفی SI دارند و تحت اشباع هستند. اما، نسبت به کلسیت و دولومیت رفتار متفاوتی دارند و فوق‌اشباع هستند. این وضعیت می‌تواند به دلیل تنوع لیتولوژی در مناطق تغذیه و تفاوت میزان انحلال کانی‌های مختلف باشد. اکثر چشمه‌های تراورتن‌ساز در مناطق مختلف دنیا چنین روند مشابهی را نشان می‌دهند (باقری^۳ و همکاران ۲۰۱۷).

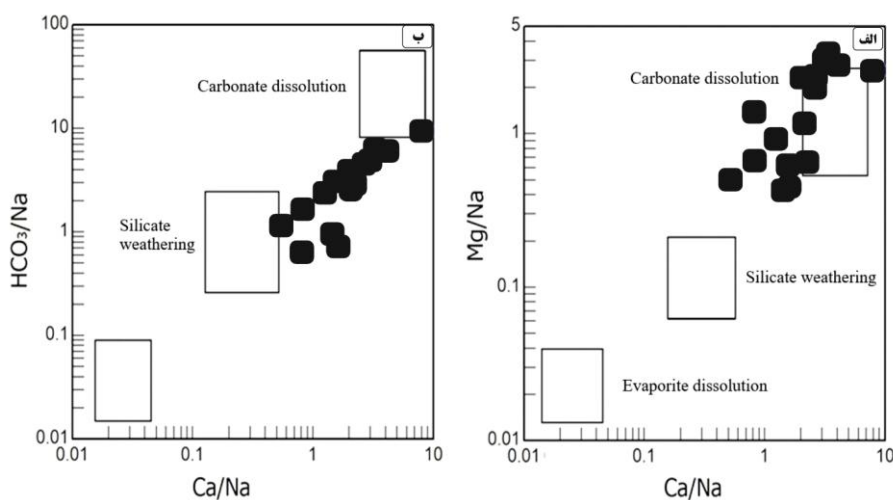


شکل ۷. شاخص اشباع‌شدگی (SI) کانی‌های مختلف در چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

1. Bagheri
2. Gemici
3. Bagheri

بررسی تکامل ژئوشیمیایی چشمه‌های منطقه

از شاخص‌های هیدروژئوشیمیایی می‌توان برای مطالعه روند تکامل انحلال و ته‌نشست مواد معدنی نیز استفاده کرد (کاپاسو و همکاران ۲۰۰۱). تکامل ژئوشیمیایی آب معمولاً با استفاده از انواع نمودارهای ترکیبی بررسی می‌شود. کانی‌های سیلیکاته کوارتز و تالک و کلسدونی در بیشتر نمونه‌ها در حالت اشباع قرار دارند (جدول ۴) و این می‌تواند نشان‌دهنده غلظت بالای سیلیس در چشمه‌های آذرشهر باشد و ارتباط چشمه‌ها را با سنگ‌های آتشفشانی داسیتی-آندزیتی نشان دهد. برای تأیید این موضوع از نسبت‌های Ca/Na در مقابل Mg/Na و HCO_3/Na (هالیم^۱ و همکاران ۲۰۱۰) استفاده شده است (شکل ۸). در نمودار Ca/Na در مقابل Mg/Na مشاهده می‌شود که چشمه‌ها در محدوده حد واسط هوازگی سیلیکات‌ها تا داخل محدوده انحلال کربنات‌ها قرار دارند (شکل ۸ الف). قرار دادن داده‌های حاصل از آنالیز چشمه‌ها روی نمودار شکل ۸ الف نشان می‌دهد منشأ سیلیس در این نمونه‌ها از هوازگی و انحلال سیلیکات‌هاست. با توجه به هوازگی بالای سنگ‌های منطقه، انحلال واحدهای رسوبی و آذرین منطقه می‌تواند منشأ سیلیس و آلومینیوم در نمونه‌های مورد بررسی در نظر گرفته شود. نمودار Ca/Na در مقابل HCO_3/Na نیز نتایج حاصل از نمودار Ca/Na در مقابل Mg/Na را تأیید می‌کند (شکل ۸ ب).

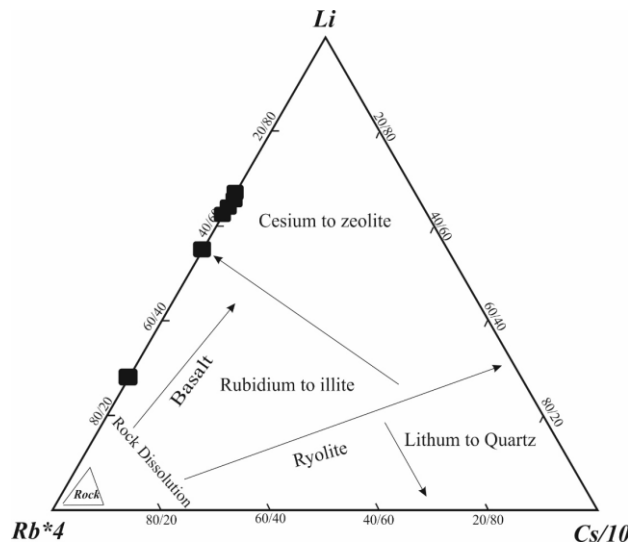


شکل ۸. نمودار نسبت مولار Ca/Na در مقابل HCO_3 و Mg/Na (هالیم و همکاران ۲۰۱۰) برای چشمه‌های منطقه آذرشهر

شکل ۹ نمودار سه‌تایی Li-Rb-Cs (گیگنباخ^۲ و گوگوتل ۱۹۸۹) را برای نمونه‌های SP1, SP7, SP8, SP12, SP13, SP16 نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار بیشتر نمونه‌ها روی ضلع لیتیم- روییدیم و با تمایل به رأس لیتیم قرار گرفته‌اند (شکل ۹). لیتیم به منزله عنصر قلیایی که کمتر تحت تأثیر فرایندهای جذب ثانویه قرار می‌گیرد و ماندگاری طولانی‌تری در محلول دارد (مینزا^۳ ۲۰۰۶) درون کوارتز و کلریت ثانویه موجود است و بنابراین لیتیم موجود در محلول ممکن است مستقیم

1. Halim
2. Giggenbach
3. Mainza

از انحلال کوارتز و کلریت ثانویه به دست آمده باشد. روبیدیم که رفتاری مشابه با پتاسیم دارد در دماهای بالا (بیشتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) از محصولات دگرسانی مانند ایلیت به دست می‌آید؛ درحالی‌که سزیم در دمای کمتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد از طریق زئولیت وارد محلول می‌شود. میانگین نسبت Li/Cs در چشمه‌های SP1, SP8, SP12, SP16 که دارای تیپ کربناته هستند برابر با ۲۷ است و در دو چشمه SP7 و SP13 سولفات‌ها این میانگین به ۳۱۳ می‌رسد (جدول ۲). روند افزایشی در نسبت مقدار Li/Cs مربوط به کاهش شدید مقادیر عنصر سزیم در نمونه‌های سولفات‌هاست. افزایش تفاوت در مقادیر عناصر پایدار که در چشمه‌های بی‌کربناته و سولفات‌ها بیشتر مشاهده می‌شود مؤید این است که این چشمه‌ها بیشتر تحت تأثیر واکنش‌های جانشینی و جذب ثانویه قرار گرفته‌اند. این نسبت نزدیک به سنگ‌های حدواسط و نشان‌دهنده انحلال لیتیم و سزیم در آب چشمه‌ها در نتیجه واکنش جزئی آب-سنگ است (گیگنباخ^۱ و گلور^۲ ۱۹۹۲).

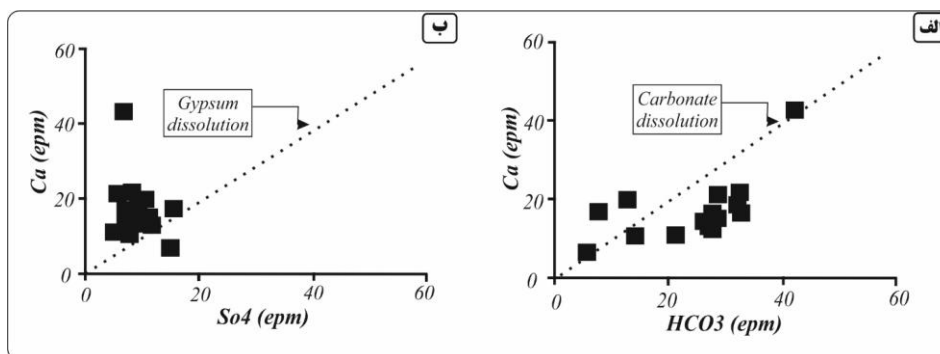


شکل ۹. غلظت نسبی عناصر Li, Rb, Cs در نمونه‌های آب چشمه‌های آذرشهر

روبیدیم و سزیم نیز می‌توانند به منزله شاخصی برای فرایند واکنش آب-سنگ در نظر گرفته شوند (گوب^۲ و همکاران ۲۰۱۳).. به دلیل شباهت شعاع یونی عناصر روبیدیم و سزیم با پتاسیم این عناصر می‌توانند از ماگما جدا شوند و به صورت جانشینی وارد ساختمان‌های کانی‌های پتاسیم‌دار-مانند فلدسپات‌ها و میکاها-شوند. در مرحله دگرسانی روبیدیم و سزیم ممکن است از شبکه کانی خارج و وارد فاز محلول شوند یا کانی‌های جدیدتری مانند کانی‌های رسی را تشکیل بدهند (برگر^۳ و همکاران ۱۹۸۸). با این حال، مطالعات صورت‌گرفته نشان می‌دهد عنصر سزیم جذب سطحی کانی‌های رسی می‌شود؛ درحالی‌که روبیدیم به دلیل شعاع یونی کمتر نسبت به سزیم می‌تواند وارد شبکه کانی‌های رسی و جانشین پتاسیم شود (وامپلر^۴ و همکاران ۲۰۱۲). بنابراین سیالات حاصل از دگرسانی می‌توانند حاوی مقادیر متفاوتی از

1. Giggenbach
2. Gob
3. Berger
4. Wampler

نسبت Rb/Cs باشند (جدول ۲)، در صورتی که این نسبت کمتر از ۲ باشد نشان‌دهنده تعادل آب با کانی‌های رسی است و اگر این نسبت بیشتر از ۵ باشد نشان‌دهنده واکنش غیر تعادلی آب با کانی‌های رسی است (گوب و همکاران ۲۰۱۳). این نسبت در چشمه‌های منطقه آذرشهر در محدوده بین ۲ تا ۲۴۲ است که نشان‌دهنده شرایط مختلف واکنش آب با کانی‌های رسی است؛ طوری که در چشمه‌های SP1, SP8, SP12, SP16 نسبت Rb/Cs بین ۲ تا ۵ است که نشان‌دهنده انحلال سنگ‌های هوازده و واکنش آب با کانی‌های رسی است (گوب و همکاران ۲۰۱۳). نمودارهای ترکیبی ابزارهای مفیدی برای شناخت منشأ شوری هستند. از نمودارهای ترکیبی مختلف جهت شناخت فرایندهای ژئوشیمیایی مؤثر بر شوری آب‌ها در نقاط مختلف دنیا استفاده شده است (هاوارد^۱ و همکاران ۱۹۹۶). در این قسمت با استفاده از نمودارهای مربوط به انحلال کانی‌های تبخیری و کربناته برای ارزیابی ارتباط یون‌های اصلی با این کانی‌ها استفاده شده است. با توجه به نمودار کلسیم در مقابل بی‌کربنات در شکل ۱۰ الف می‌توان گفت منشأ کلسیم به‌تنهایی نمی‌تواند در اثر انحلال کربنات‌ها باشد. زیرا از خط انحلال فاصله گرفته‌اند. اما روند افزایشی دارند. در نمودار کلسیم در مقابل سولفات (شکل ۱۰ ب) نیز نمونه‌ها به صورت پراکنده در بالای خط انحلال ژپیس قرار دارند که نشان می‌دهد فقط انحلال ژپیس صورت نگرفته و عوامل دیگری، همچون تبادل کاتیونی و انحلال کلسیت، نیز در غلظت کلسیم نقش داشته‌اند.

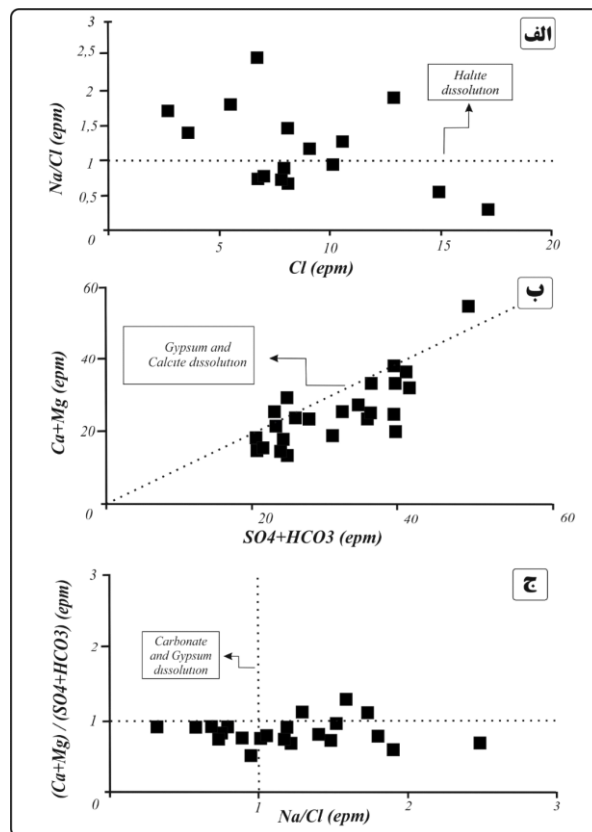


شکل ۱۰. نمودار کلسیم در مقابل بی‌کربنات و نمودار کلسیم در مقابل سولفات برای چشمه‌های آذرشهر

شکل ۱۱ الف نمودار غلظت سدیم به کلر را در مقابل کلر نشان می‌دهد. اگر نسبت کلر به سدیم ۱ باشد منشأ کلر می‌تواند مرتبط با انحلال نمک باشد که با یک خط مستقیم در شکل ۱۱ الف نشان داده شده است. نسبت Na/Cl در نمونه‌های منطقه آذرشهر در محدوده کمتر و بیشتر از ۱ قرار دارند. با افزایش شوری این نسبت کمتر از ۱ شده است. اگر انحلال نمک منشأ شوری باشد، باید داده‌ها نزدیک به خط انحلال قرار گیرند. انحراف از این خط نشان‌دهنده این است که مقدار سدیم در نمونه‌ها کمتر یا بیشتر شده است. این وضعیت می‌تواند به دلیل فرایند تبادل کاتیونی با کلسیم و منیزیم در منطقه باشد. انحلال ژپیس نیز می‌تواند عامل شوری باشد و افزایش کلسیم و سولفات را به همراه داشته باشد. برای شناسایی فرایندهای هیدروژئوشیمیایی و تبادل یونی در آب می‌توان از نمودار یون‌های اصلی در مقابل هم استفاده کرد (باقری و همکاران ۲۰۱۷). در نمودار مجموع کلسیم و منیزیم در مقابل سولفات و بی‌کربنات (شکل ۱۱ ب)

نمونه‌ها از خط انحلال کلسیت و ژیپس فاصله گرفته‌اند. هر گونه انحراف از خط نشان‌دهنده عملکرد فرایندی دیگر غیر از انحلال در منطقه است که مهم‌ترین عامل تبادل کاتیونی است. تبادل کاتیونی می‌تواند مستقیم یا معکوس صورت گیرد. در اثر تبادل کاتیونی مستقیم، سدیم از رسوبات وارد آب می‌شود و غلظت آن افزایش می‌یابد. اما کلسیم یا منیزیم رسوب می‌کند و غلظت آن‌ها در آب کم می‌شود. بنابراین، نمونه‌هایی که در زیر خط انحلال قرار گرفته‌اند نشان‌دهنده رخداد تبادل کاتیونی مستقیم‌اند. اما نمونه‌هایی که در بالای خط قرار گرفته‌اند احتمال دارد در اثر هجوم آب شور اتفاق افتاده باشند که در اثر آن سدیم ته‌نشست و کلسیم و منیزیم آزاد می‌شود. در چشمه‌هایی که با فاصله از این خط قرار گرفته‌اند تأثیر فرایند تبادل یونی مستقیم بارزتر است. با توجه به شکل ۱۱ ب، به دلیل اینکه در اکثر نمونه‌ها مقدار غلظت Ca و Mg کاهش یافته است و زیر خط انحلال پلات شده‌اند، این وضعیت می‌تواند در اثر تبادل با سدیم صورت گرفته باشد.

شکل ۱۱ ج رابطه $Ca+Mg/SO_4+HCO_3$ در مقابل Na/Cl را نشان می‌دهد. در اثر پدیده تبادل یونی مستقیم، نسبت Na/Cl بیشتر از ۱ می‌شود و اگر تبادل یونی معکوس باشد این نسبت کمتر از ۱ می‌شود. نمونه‌های منطقه آذرشهر به صورت مساوی هم در زون تبادل مستقیم هم در زون تبادل معکوس قرار گرفته‌اند. البته اکثر نمونه‌ها در نزدیکی خط انحلال کربنات‌ها و ژیپس با کمی انحراف قرار گرفته‌اند. اما مقدار Na/Cl زیاد تغییر کرده است (شکل ۱۱ ج). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات سدیم می‌تواند در اثر انحلال کانی‌های سیلیکاته دیگر در منطقه به سیال اضافه شده باشد.



شکل ۱۱. الف) نمودار نسبت سدیم به کلر در مقابل کلر؛ ب) نمودار مجموع کلسیم و منیزیم در مقابل مجموع سولفات

و بی کربنات؛ ج) رابطه بین نسبت Na/Cl در مقابل $Ca+Mg/SO_4+HCO_3$

تعیین منشأ آب و شورری با استفاده از نتایج ایزوتوپی

در این بخش به مطالعه و بررسی ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ (O^{18}) و دوتریم (H^2) موجود در آب چشمه‌ها پرداخته می‌شود. مقادیر ایزوتوپی در ۶ نمونه آب انتخاب شده با روش LGR اندازه‌گیری و نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده ایزوتوپ‌های اکسیژن (O^{18}) و هیدروژن (H^2) بهترین ردیاب در تعیین منشأ آب زیرزمینی‌اند. خط بارش جهانی با استفاده از نمونه‌های مختلف بارش از همه نقاط دنیا در طول سال آبی در مؤسسه IAEA در اتریش اندازه‌گیری و تفسیر می‌شود. این خط برای کل دنیا ترسیم و فرمول آن تحت عنوان خط بارش جهانی GMWL ترسیم شده است ($\delta D = 8 \delta^{18}O + 10\%$) (کریگ ۱۹۶۱).

مقادیر ایزوتوپی بارش در طول یک سال آبی اندازه گرفته شده و خط بارش محلی LMWL برای منطقه به دست آمده است. روش معمول تفسیر نتایج آنالیز O^{18} و D پلات کردن مقادیر $\delta^{18}O$ در مقابل δD است. با مقایسه داده‌ها با خط آب جوئی می‌توان به فرایندهای اتفاق افتاده پی برد. آبی که ترکیب ایزوتوپی آن روی خط جوئی قرار می‌گیرد، احتمالاً، از میعان بخار آب منشأ گرفته است و فرایندهای ایزوتوپی دیگر روی آن تأثیر نگذاشته‌اند. انحراف از خط آب جوئی ناشی از فرایندهای ایزوتوپی مختلفی است. این فرایندها در اکثر موارد به طور یکسان روی رابطه بین δD و $\delta^{18}O$ اثر می‌گذارند و موقعیت نقاط به شناخت فرایند کمک می‌کند. وقتی ترکیب ایزوتوپی آب زیرزمینی در طول خط آب جوئی قرار گیرد، آب زیرزمینی کم عمق ترکیب ایزوتوپی شبیه باران دارد. پس فرض می‌شود هیچ فرایندی ترکیب ایزوتوپی بارش تغذیه کننده آب زیرزمینی را تغییر نداده است. مقدار اکسیژن ۱۸ در آب چشمه‌ها بین $-8/02$ تا $-10/21$ پرمیل و دوتریم بین $-52/16$ تا $-71/08$ پرمیل متغیر است. در شکل ۱۲ الف مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در مقابل دوتریم برای چشمه‌های منطقه آذرشهر نشان داده شده است.

جدول ۴. غلظت ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم اندازه‌گیری شده در چشمه‌های آذرشهر

Sample	Temperature (°C)	Elevation (m)	$O^{18}\%$	$H^2\%$
SP1	۲۱	۱۴۳۰	-۱۰,۴	-۶۷,۸۴
*SP7	۱۵	۱۳۴۰	-۸,۲۷	۵۲,۱۶
SP8	۲۶	۱۴۰۰	-۱۰,۲۱	-۷۱,۰۸
SP12	۱۸	۱۴۵۰	-۹,۸۵	-۶۵,۲۶
*SP13	۱۴	۱۴۵۰	-۸,۰۲	-۶۱,۰۸
*SP16	۱۵	۱۴۰۰	-۹,۰۷	-۶۱,۴۷

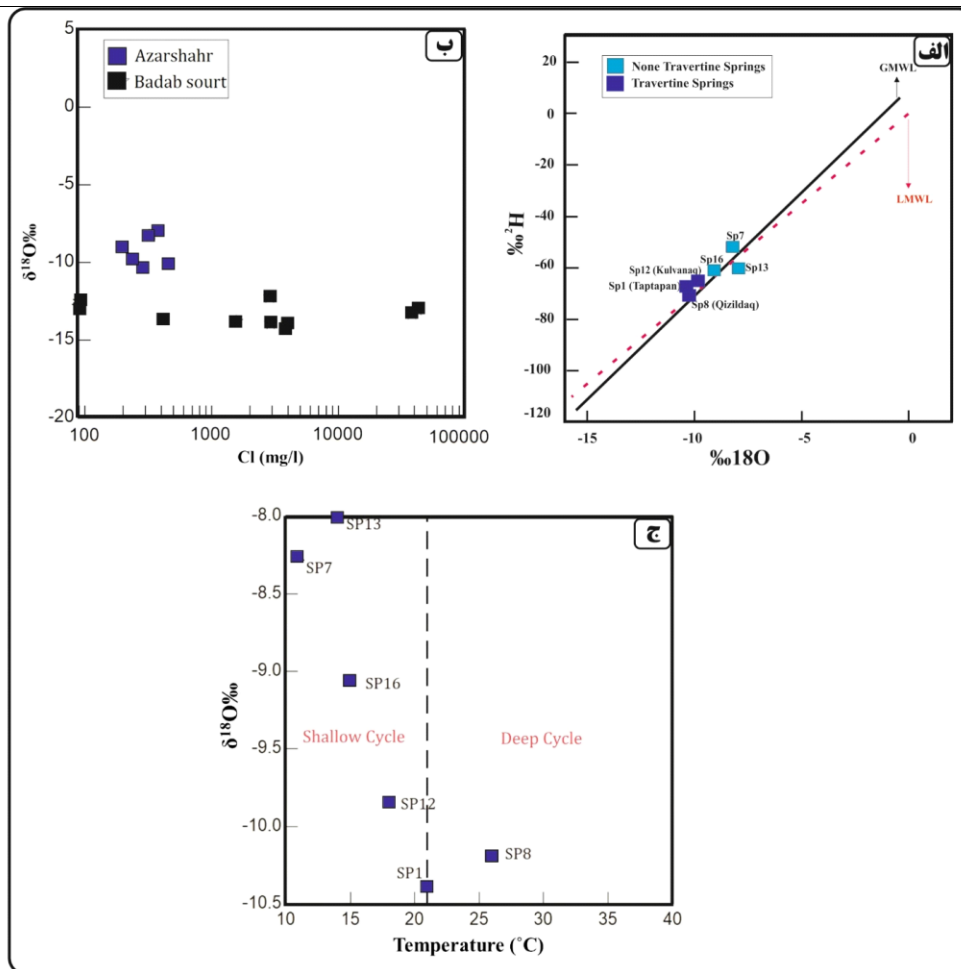
* Non travertine springs

همان‌طور که در شکل ۱۲ الف مشاهده می‌شود، همه نمونه‌ها در نزدیکی خط آب جوئی جهانی قرار گرفته‌اند و این نشان‌دهنده جوئی بودن منشأ آب چشمه‌هاست. میزان دوتریم و اکسیژن ۱۸ موجود در آب باران در اثر تغییرات ارتفاع محل تغذیه تغییر می‌کند؛ طوری که هر چه ارتفاع افزایش یابد غلظت ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریم کاهش می‌یابد

(کلارک ۱۹۹۰). هرچند در چشمه‌های آذرشهر اختلاف ارتفاع ناچیز است، غلظت ایزوتوپ‌های اکسیژن و دوتریم چشمه‌های این منطقه اختلاف دارند. دو چشمه غیرتراورتن‌ساز (SP7, SP13) که تیپ آب سولفات دارند، با داشتن مقادیر بالاتری از اکسیژن ۱۸ و دوتریم، با فاصله نسبی از سایر چشمه‌ها قرار گرفته‌اند. چشمه غیرتراورتن‌ساز SP16 و چشمه تراورتنی SP8 در مقایسه با چشمه‌های SP1 و SP12 که در مجاورت یکدیگرند مقادیر بالاتری اکسیژن ۱۸ و دوتریم دارند. به طور کلی، چشمه‌های غیرتراورتنی نسبت به چشمه‌های تراورتن‌ساز ایزوتوپ‌های غنی‌تری دارند.

با توجه به اینکه چشمه‌های تراورتن‌ساز دارای مقادیری گاز CO_2 و احتمالاً دارای سیستم گردش عمیق‌تر آب زیرزمینی هستند، باید ارتفاع منطقه تغذیه آن‌ها بالاتر باشد. در کل، می‌توان نتیجه گرفت چشمه‌های تراورتن‌ساز نسبت به دیگر چشمه‌ها ارتفاع منطقه تغذیه بالاتری دارند. همچنین وجود گاز CO_2 باعث کاهش غلظت ایزوتوپی در آب چشمه‌های تراورتن‌ساز می‌شود. بنابراین چشمه‌های تراورتن‌ساز نسبت به چشمه‌های غیرتراورتن‌ساز ایزوتوپ سبک‌تری دارند (محمدی و همکاران ۲۰۲۰). گفتنی است نوع تغذیه آبخوان نیز می‌تواند مقادیر ایزوتوپی را تغییر دهد. به طور کلی هر چه ارتفاع بیشتر باشد سیستم بارش بیشتر به صورت برف خواهد بود و با توجه به سبک‌تر بودن ایزوتوپ در برف، طبیعتاً ایزوتوپ چشمه‌های تراورتن‌ساز کاهش می‌یابد. منشأ شوری چشمه‌های تراورتن‌ساز آذرشهر مربوط به انحلال هالیت است. زیرا آن‌ها در نزدیکی خط بارش محلی (LMWL) واقع شده‌اند. همچنین با افزایش مقدار کلر نمونه‌ها، همانند نمونه‌های منطقه باداب‌سورت (باقری و همکاران ۲۰۱۷)، مقادیر $\delta^{18}O$ رفتار تقریباً پایداری خواهند داشت و این انحلال هالیت را به منزله منشأ شوری آب چشمه‌ها تأیید و فرایند تبخیر را رد می‌کند (شکل ۱۲ ب) (باقری و همکاران ۲۰۱۷).

شکل ۱۲ ج تغییرات $\delta^{18}O$ با درجه حرارت را در چشمه‌های منطقه آذرشهر نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، به جز نمونه SP8 و SP1، همه نمونه‌های آب چشمه‌های منطقه در ناحیه با عمق گردش سطحی قرار می‌گیرند (شکل ۱۲ ج). اما، با توجه به دمای بالاتر چشمه‌ها نسبت به دمای محیط، احتمال گردش عمقی آب نیز وجود دارد. این موضوع به‌خصوص در مورد چشمه‌های تراورتن‌ساز صدق می‌کند که باید گردش عمقی صورت گیرد تا دما افزایش یابد و باعث افزایش قدرت انحلال‌پذیری در کنار افزایش CO_2 شود. انرژی و گرادیان برای چرخش عمقی از طریق اختلاف ارتفاع منطقه تغذیه با تخلیه تأمین می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع منطقه تغذیه چشمه‌های تراورتن‌ساز (که کمی گرم‌تر بوده‌اند) بیشتر بوده و به همین دلیل مقدار ایزوتوپی آن‌ها نیز تا حدودی کمتر از بقیه شده است.



شکل ۱۲. الف) تغییرات ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و دوتریم برای چشمه‌های تراورتن‌ساز (SP1, SP8, SP12) و چشمه‌های غیر تراورتن‌ساز (SP7, SP13, SP16): GMWL: خط آب جوی جهانی، LMWL: خط آب جوی محلی؛ ب) نمودار کلر در مقابل اکسیژن ۱۸ برای چشمه‌های منطقه مورد مطالعه در مقایسه با چشمه‌های باداب‌سورت (باقری و همکاران ۲۰۱۷)؛ ج) نمودار تغییرات اکسیژن ۱۸ در مقابل درجه حرارت برای چشمه‌های منطقه آذرشهر

نتیجه

مطالعه منشأ آب و تکامل ژئوشیمیایی چشمه‌های تراورتن‌ساز و غیرتراورتن‌ساز منطقه آذرشهر با استفاده از داده‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی و غلظت فلزات سنگین نتایج زیر را به دست داده است:

- از لحاظ اسیدیته، آب چشمه‌های مورد مطالعه همچون دیگر مناطق کارستی و تراورتنی در حد خنثی است و مقدار EC در همه چشمه‌های منطقه از حد استاندارد شرب بالاتر و لب‌شور تا شور است و تیپ آب چشمه‌های تراورتن‌ساز منطقه بی‌کربناته و تیپ آب چشمه‌های غیرتراورتن‌ساز کلروره تعیین شده است.
- بررسی منشأ یون‌های اصلی موجود در آب چشمه‌ها روند مشابهی را برای چشمه‌ها نشان می‌دهد که انحلال کربنات‌ها و تا حدودی تبخیری‌ها (ژپیس و هالیت) عوامل اصلی تعیین‌کننده ترکیب شیمیایی آن‌ها هستند.

۳. کانی‌های کربناته مانند کلسیت و آراگونیت در همه نمونه‌های آب چشمه‌های تراورتن‌ساز آذرشهر در حالت اشباع قرار دارند و آب همه چشمه‌های مورد بررسی نسبت به کانی‌های کوارتز و کلسدونی فوق اشباع هستند.
۴. در بررسی نمودارهای ترکیبی مربوط به یون‌های اصلی مشخص شد منشأ کلسیم و شوری به تنهایی نمی‌تواند در اثر انحلال کربنات‌ها و ژپس و تبخیری‌ها باشد و عوامل دیگری همچون تبادل کاتیونی نیز تأثیر داشته‌اند.
۵. مطالعات ایزوتوپی چشمه‌های منطقه آذرشهر نشان‌دهنده منشأ جوی آب این چشمه‌هاست. عمق چرخش آب در چشمه‌های تراورتن‌ساز قزل‌داغ و تاپتاپان بسیار زیاد است و ارتفاع منطقه تغذیه بالاتری نسبت به دیگر چشمه‌ها دارند.

منابع

- Bagheri, R., Nadri, A., Raeisi, E., Eggenkamp, H.G.M., Kazemi, G.A., & Montaseri A. (2014). "Hydrochemical and isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{37}\text{Cl}$ and $\delta^{81}\text{Br}$) evidence for the origin of saline formation water in a gas reservoir", *Chemical Geology*, 384, pp. 62–75.
- Bagheri, R., Jafari, H., & Bagheri, F. (2017). "Etiology of Salinity and Water Origin, the Main Dilemma of Badab Sourt, a Unique Travertine Spring", *Groundwater*, 10, pp. 45-60.
- Berger, G., Schot, J., & Guy, C. (1988). "Behavior of Li, Rb and Cs during basalt glass and olivine dissolution and chlorite, smectite and zeolite precipitation from seawater: experimental investigations and modelization between 50° and 300°C", *Chemical Geology*, 71, pp. 297-312.
- Capasso, G., D'Alessandro, W., Favara, R., Inguaggiato, S., & Parello, F. (2001). "Interaction between the deep fluids and the shallow groundwaters on Vulcano island (Italy)", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108, pp. 187-198.
- Chafetz, H.S. & Folk, R.L. (1984). "Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents", *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, pp. 289-316.
- Clark, I.D. & Fontes, J.C. (1990). "Palaeoclimatic reconstruction in northern Oman based on carbonates from hyperalkaline groundwaters", *Quaternary Research*, 33, pp. 320–336.
- Craig, H. (1961). "Isotopic Variations in Meteoric Waters", *Science*, 133, pp. 1702-1703.
- Fouke, B.W., Farmer, J.D., Des Marais, D.J., Pratt, L., Sturchio, N.C., Burns, P.C., & Discipulo, M.K. (2000). "Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, U.S.A.)", *Journal of Sedimentary Research*, 70, pp. 565–585.
- Gemici, Ü. & Tarcan, G. (2002). "Hydrogeochemistry of the Simav geothermal field, Western Anatolia, Turkey", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116, pp. 215-233.
- Ghadirzadeh, A. (2003). 1/100000 Geological map of Azarshahr quadrangle, Geological Survey of Iran. (in Persian)
- Giggenbach, W.F. & Goguel, R.L. (1989). Collection and Analysis of Geothermal and Volcanic Water and Gas Discharges, Chemistry Division, DSIR, Petone, New Zealand. Report No. CD 2401.
- Giggenbach, W. & Glover, R.B. (1992). "Tectonic regime and major processes governing the chemistry of water and gas discharges from the Rotorua geothermal field, New Zealand", *Geothermics*, 21, pp. 121-140.

- Gob, S., Loges, A., Nolde, N., Bau, M., & Jacob, D.E. (2013). "Gregor Markl. Major and trace element compositions (including REE) of mineral, thermal, mine and surface waters in SW Germany and implications for water-rock interaction", *Applied Geochemistry*, 14, pp. 254-280.
- Halim, M.A., Majumder, R.K., Nessa, S.A., Hiroshiro, Y., Sasaki, K., Saha, B.B., Saepulohd, A., & Jinno, K. (2010). "Evaluation of processes controlling the geochemical constituents in deep groundwater in Bangladesh: Spatial variability on arsenic and boron enrichment", *Journal of Hazardous Materials*, 180, pp. 50-62.
- Hounslow, A.W. (1995). *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 397.
- Howard, F.W. & Ken Mulling, E. (1996). "Hydrochemical analysis of groundwater flow and saline intrusion in the Clarendon basin, Jamaica", *Groundwater*, 34, pp. 801-810.
- Jackson, J. A. (1992). "Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey and Caucasus", *Journal of Geophysical Research*, 97, pp. 12471-12479.
- Jones, B. & Renaut, R.W. (2010). "Calcareous spring deposits in continental settings", In: Alonso Zarza, A.M. & Tanner, L.H. (Ed), *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments, and Processes. Development in Sedimentology*, 61, pp. 177-224.
- Liu, H., Zhou, X., Zhang, Y., Wang, M., Tan, M., Hai, K., Yu, M., & Huo, D. (2020). "Hydrochemical characteristics of travertine-depositing hot springs in western of Yunnan, China, "Quaternary International", 547, pp. 63-74.
- Mainza, D. (2006). "The chemistry of geothermal waters of SW-Uganda", Report of Geothermal Training Programme, Iceland, pp. 219-244.
- Marie, A. & Vengosh, A. (2001). "Sources of salinity in groundwater from Jericho area, Jordan valley", *Groundwater*, 39, pp. 240-248.
- Mohammadi, Z., Vaselli, O., Muechez, P., Claes, H., Capezzuoli, E., & Swennen, R. (2020). "Hydrogeochemistry, stable isotope composition and geothermometry of CO₂-bearing hydrothermal springs from Western Iran: Evidence for their origin, evolution and spatio-temporal variations", *Sedimentary Geology*, 404, 105676.
- Mohammadzadeh, H. & Daneshvar, M. R. M. (2020). "A comparison of hydro-geochemistry and stable isotope composition of travertine-depositing springs, Garab in NE Iran and Pamukkale in SW Turkey", *Carbonates and Evaporites*, 35(1), pp. 1-11.
- Parkhurst, D.L. & Appelo, C.A.J. (2013). Description of input and examples for PHREEQC version 3, a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S", *Geological Survey Techniques and Methods*, Book 6, chap. A43, p. 497.
- Pentecost, A. (2005). *Travertine*. Springer-Verlag, Berlin, p. 445.
- Piper, A.M. (1953). "A graphic representation in the geochemical interpretation of groundwater analyses", *Transactions of the American Geophysical Union*, 25, pp. 914-923.
- Schoeller, H. (1967). "Geochemistry of groundwater", *An international guide for research and practice*, UNESCO, Chapter 15, pp. 1-18.
- Wampler, J.M., Krogstad, E.J., Elliot, W.C., Kahn, B., & Kaplan, D.I. (2012). "Long-term selective retention of natural Cs and Rb by highly weathered coastal plain soils",

Environmental Science and Technology, 46, pp. 3837-3843.

Wang, S.W., Kuo, Y.M., Kao, Y.H., Jang, C.S., Kumar Maji, S., Chang, F.J., & Liu C.W. (2011). "Influence of hydrological and hydrogeochemical parameters on arsenic variation in shallow groundwater of southwestern Taiwan", *Journal of Hydrology*, 408, pp. 286-295.