

نقش کنترل‌کننده‌های ساختاری در هیدروژئوشیمی چشمه‌های تراورتن ساز منطقه آذرشهر، شمال غرب ایران

کریم تقی‌پور^{۱*}، محمدمهدی خطیب^۲، محمودرضا هیهات^۳، عبدالرضا واعظی هیر^۴ و اسماعیل شبانیان^۵

۱. دانشجوی دکترای تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند
۲. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند
۳. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند
۴. دانشیار گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز
۵. استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۱۶

چکیده

نهشته‌های تراورتن منطقه آذرشهر، واقع در شمال غرب ایران، یکی از مجموعه‌های منحصربه‌فرد تراورتن در دنیا می‌باشد. فرایند نهشت تراورتن در حال حاضر نیز در تعدادی از چشمه‌های فعال تراورتن ساز ادامه دارد. در این پژوهش با تلفیق داده‌های ساختاری و تکتونیکی، مطالعات ژئوفیزیکی و هیدروژئوشیمیایی به مطالعه منشأ آب و جایگاه چشمه‌های فعال تراورتن ساز پرداخته شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های برجا و تیپ تراورتن‌ها نشان داد که این چشمه‌ها از نوع ترموژن و با منشأ هیدروترمال هستند. بررسی نمودارهای هیدروژئوشیمیایی و نسبت‌های یونی نشان داد که تیپ آب چشمه‌ها از نوع کربناته کلسیم می‌باشد که در اثر اختلاط با آب‌های شور، میزان یون سدیم و کلر افزایش یافته است. مجاورت این نهشته‌ها با دریاچه ارومیه و بررسی نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیک نشان داد که منشأ این آب‌های شور، آب دریاچه ارومیه و با شوره‌های مرتبط با آن می‌باشد که از طریق سیستم‌های شکستگی هدایت شده و در پهنه‌های کششی بین گسل‌ها با سیالات هیدروترمال اشباع از بی‌کربنات اختلاط یافته‌اند. این پدیده نشان می‌دهد که هیدروژئوشیمی چشمه‌های مزبور تحت تاثیر آب دریاچه ارومیه و با شوره‌های مرتبط با آن در قاعده تراورتن‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: چشمه‌های تراورتن، کنترل‌کننده‌های ساختاری، هیدروژئوشیمی، دریاچه ارومیه.

مقدمه

چشمه‌های ایجادکننده آنها با سیستم‌های شکستگی کاملاً پذیرفته شده است (به‌عنوان مثال Bargar, 1978; Chafetz and Folk, 1984; Guo and Riding, 1992; Altunel and Hancock, 1993; Ford and Pedley, 1996; Hancock et al., 1999; Atabey, 2002). نهشته‌های تراورتن آذرشهر از نوع شکاف-پشته است و در ارتباط با

نهشته‌های تراورتن در منطقه آذرشهر و در مجاورت دریاچه ارومیه با وسعت بیش از ۵۰ کیلومتر مربع یکی از مجموعه‌های منحصربه‌فرد تراورتن در دنیا از نظر وسعت و ضخامت می‌باشد. امروزه ارتباط نهشته‌های تراورتن و

* نویسنده مرتبط: taghipour@birjand.ac.ir

مجموعه آتشفشانی سهند بخشی از کمان ماگمایی ارومیه-دختر می‌باشد (Alavi, 1994). مجموعه آتشفشانی سهند بر روی پی‌سنگی از سنگ‌های رسوبی با سن‌های مختلف قرار گرفته است. این مجموعه بیشتر از گدازه‌های ربولیتی، داسیتی و آندزیتی تشکیل شده که در بین آنها توف و خاکستر فراوان دیده می‌شود. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی در منطقه مورد مطالعه، سازندهای لالون و میلا به سن کامبرین می‌باشند که به صورت ناپیوسته با واحدهای مزوزویک و نهشته‌های آذرآوری پلیو-کواترنری پوشیده شده‌اند. واحدهای مزوزویک در منطقه شامل آهک‌های ضخیم و توده‌ای به سن ژوراسیک (هم‌ارز سازند لار و دلیچای) و آهک‌های کرتاسه زیرین (هم‌ارز سازند تیزکوه) می‌باشند (شکل ۱). این واحدهای آهکی در بخش جنوب باختری با مجموعه نهشته‌های کرتاسه فوقانی همبندی گسلی دارد. واحدهای سنگی کرتاسه فوقانی شامل شیل‌های سیاه، ماسه‌سنگ و شیل‌های آهکی همراه با میان لایه‌هایی از گدازه‌های اسیدی و بازیک می‌باشند (قدیرزاده، ۱۳۸۱). واحدهای سنگی نئوژن با ناپیوستگی زاویه‌دار بر روی واحدهای قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند. این سنگ‌ها شامل کنگلومرای ولکانوکلاستیک و لاهار به سن میوسن و کنگلومرا، ماسه‌سنگ و سیلتستون به سن پلیوسن-کواترنری می‌باشند. در کواترنری و هم‌زمان با فعالیت‌های آتشفشانی مجموعه سهند، رسوب‌گذاری واحدهای تراورتن آغاز شده است. پی‌سنگ نهشته‌های تراورتن واحدهای به سن پلیو-کواترنری است. فرایند رسوب‌گذاری تراورتن هم‌اکنون نیز به‌طور محدود در تعدادی چشمه فعال از جمله چشمه‌های تاپ تاپان، قزل داغ و داشکسن ادامه دارد.^۱

روش مطالعه

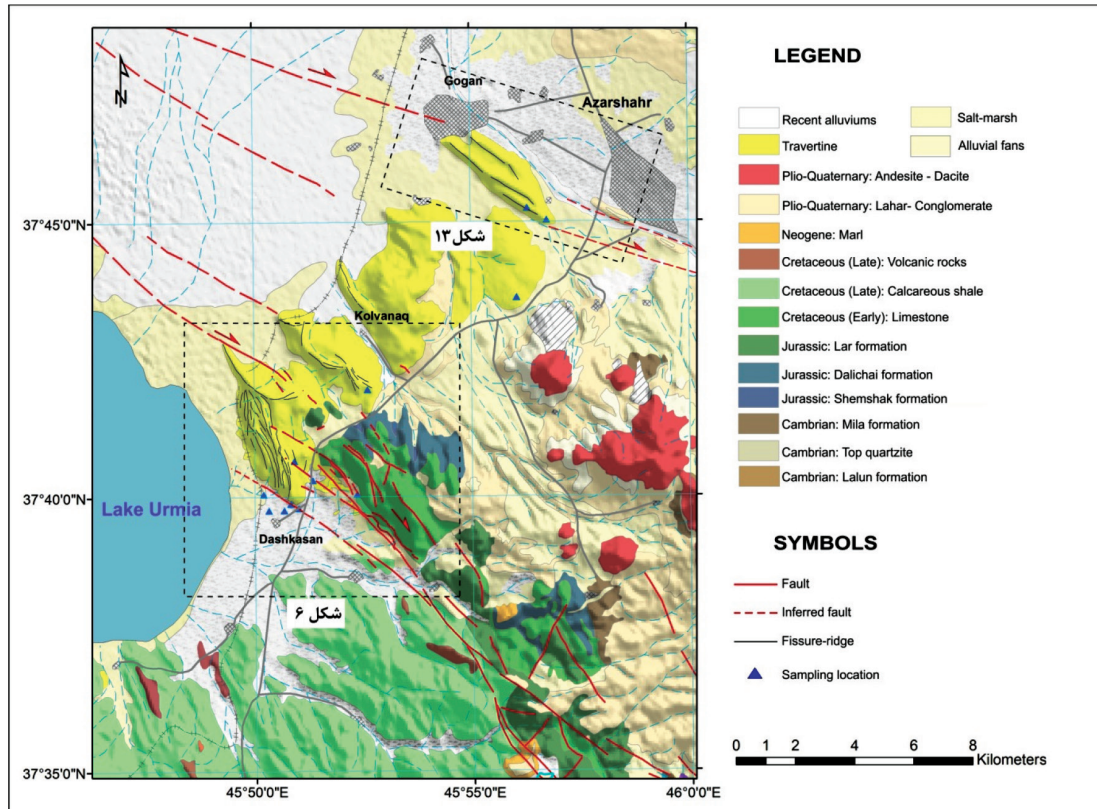
در این پژوهش مطالعات زمین‌شناسی و ساختاری با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های DEM و نیز پیمایش‌های صحرایی انجام شد. به‌منظور بررسی ویژگی‌های هیدروژنوشیمیایی و منشأ آب چشمه‌های تراورتن ساز در منطقه مورد مطالعه، اقدام به نمونه‌برداری و اندازه‌گیری برجا در این چشمه‌ها شد. پس از شناسایی چشمه‌های فعال

1. Relay ramp

فعالیت گسل‌های امتدادلغز منطقه تشکیل شده‌اند (تقی پور و عباسی، ۱۳۸۴؛ تقی پور و محجل، ۱۳۹۲). تراورتن‌های تیپ شکاف-پشته از یک شکاف مرکزی و لایه‌های تراورتن شیب‌دار مجاور آن تشکیل می‌شوند. مطالعات انجام یافته نشان می‌دهد که تراورتن‌های تیپ شکاف-پشته عمدتاً در پهنه‌های همپوشانی گسل‌های امتدادلغز و یا پهنه همپوشانی^۱ گسل‌های نرمال ایجاد می‌شوند (Hancock et al., 1999; Atabey, 2002; Altunel, 2005). در مجموع تراورتن‌های آذرشهر تعدادی از چشمه‌های تراورتن ساز در حال حاضر نیز فعال می‌باشند. مطالعات متعددی برای بررسی ویژگی‌های هیدروژنوشیمیایی و منشأ آب چشمه‌های تراورتن ساز در دنیا انجام شده است (Dilsiz, 2006; Liu et al., 2012)، ولی تاکنون ویژگی‌های هیدروژنوشیمیایی چشمه‌های تراورتن ساز و منشأ آب آنها در ایران و به‌ویژه در آذرشهر مورد مطالعه قرار نگرفته است. از سویی دیگر قرار گرفتن این نهشته‌ها و چشمه‌ها در مجاورت دریاچه ارومیه، این ایده را مطرح می‌سازد که بین این چشمه‌ها و آب دریاچه ارومیه ارتباطی وجود داشته باشد. با توجه به نبود پیرومتر در سازندهای سخت منطقه، چشمه‌های تراورتن ساز تنها منابع موجود برای بررسی تغییرات آب این سازندها می‌باشند. مطالعات انجام یافته توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور نشان می‌دهد که آب دریاچه ارومیه در مناطق اطراف روستای شیرامین (جنوب منطقه مورد مطالعه) و گوگان (شمال منطقه مورد مطالعه) باعث شور شدن آبخوان‌ها شده است (شارمد و همکاران، ۱۳۹۴). البته باید در نظر داشت مطالعاتی که نشان‌دهنده هجوم آب دریاچه ارومیه به مناطق اطراف شده، منحصر به آبخوان‌های آزاد و آبرفتی است، درحالی‌که منابع تغذیه‌کننده چشمه‌های تراورتن ساز، سنگ‌های سخت و عمیق می‌باشند. در این پژوهش با تلفیق داده‌های تکتونیکی، هیدروژنوشیمیایی و ژئوفیزیکی نقش کنترل‌کننده ساختاری در شکل‌گیری چشمه‌های تراورتن ساز و منشأ آب آنها در سازندهای سخت بررسی شده است.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در حاشیه باختری مجموعه آتشفشانی سهند در جنوب آذرشهر قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های برجنا نشان می‌دهد که pH آب در تمامی چشمه‌های تراورتن ساز پایین‌تر از ۷ می‌باشد. همچنین دمای بالای این چشمه‌ها (جدول ۱) نسبت به میانگین دمای آب‌های زیرزمینی منطقه که تقریباً ۱۱ درجه سانتیگراد می‌باشد (شارمد و همکاران، ۱۳۹۴) نشان می‌دهد که آب این چشمه‌ها از یک منبع هیدروترمال منشأ گرفته‌اند. میزان دما و PH آب این چشمه‌ها نشان می‌دهد که نهشته‌های تراورتن منطقه از نوع ترموزن (Thermogene) می‌باشند (Pantecost, 2005). این وضعیت به‌ویژه در مورد چشمه S3 با دمای ۲۶ درجه سانتی‌گراد کاملاً مشهود می‌باشد. باین‌حال تأثیرپذیری آبدی این چشمه‌ها از میزان بارندگی‌های سالیانه (تقی پور و محجل، ۱۳۹۲) نشانگر اختلاط آب این چشمه‌ها با آب‌های جوی نیز می‌باشد.

تراورتن ساز، نمونه‌برداری در ظرف‌های پلاستیکی انجام شد. نمونه‌های برداشت شده در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز با روش کروماتوگرافی یونی مورد آزمایش قرار گرفت. آنالیز شیمیایی نمونه‌ها شامل آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی می‌باشد. همچنین در محل نمونه‌برداری خصوصیات فیزیکی شامل آبدی چشمه‌ها و درجه حرارت آب اندازه‌گیری شده دمای آب با استفاده از دماسنج دیجیتالی در محل خروجی چشمه‌ها اندازه‌گیری شد. خصوصیات شیمیایی شامل PH و هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها نیز در محل نمونه‌برداری به کمک دستگاه‌های پرتابل اندازه‌گیری شد. به دلیل خشکسالی‌های اخیر تعدادی از چشمه‌های تراورتن ساز در منطقه خشک شده‌اند و تعداد ۱۱ چشمه فعال باقی مانده‌اند. علاوه بر این چشمه‌ها از دو چشمه گسلی نیز که در مجاورت نهشته‌های تراورتن قرار گرفته‌اند (چشمه ولزید و چشمه داشکسن ۶) نیز نمونه‌برداری انجام گرفت (شکل ۲ و جدول ۱).

قابل تفسیر است. نکته قابل بحث در تغییرات کاتیون‌ها در نقاط مختلف حوضه می‌باشد. همچنین در بیشتر چشمه‌ها، کاتیون غالب، کلسیم و تیپ آب بی‌کربناته کلسیم (Ca-HCO_3) می‌باشد.

در نمودار پایپر قرار گرفتن بسیاری از نمونه‌ها در امتداد یک خط بر اساس صداقت (۱۳۷۸)، تأثیر اختلاط بین آب‌های مختلف را نشان می‌دهد. اختلاط آب‌های با شیمی مختلف برخلاف آبخوان‌های آبرفتی، در آبخوان‌های آهکی یک پدیده غالب است و علت آن انتقال آب‌های با شیمی مختلف در امتداد شکستگی‌ها و اختلاط آنها در محل تقاطع درزه‌ها می‌باشد.

به‌منظور بررسی تغییرات توام یون‌ها و همچنین تغییرات در تیپ (type) آب در چشمه‌های منطقه مورد مطالعه از نمودار پایپر استفاده شد. در این نمودار تعداد زیادی نمونه را می‌توان نشان داد که از ترکیب سه میدان مجزا درست شده است. در این نمودار یون‌ها در دو مثلث به‌صورت درصدی از آنیون‌ها و کاتیون‌ها به میلی‌اکی‌والان بر لیتر رسم می‌شوند که مقادیر ترسیمی برای آنالیز به لوزی بین دو مثلث منتقل می‌شود.

همان‌طور که در نمودار پایپر مربوط به چشمه‌های منطقه مورد مطالعه (شکل ۳) ملاحظه می‌شود آنیون غالب در تمام نمونه‌ها بی‌کربنات می‌باشد که با توجه به لیتولوژی خاص منطقه که از سنگ‌های آهکی تشکیل شده است،

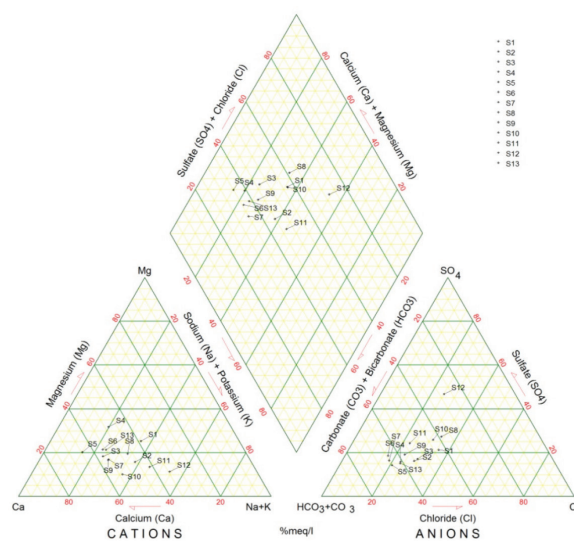


شکل ۲. تصاویر تعدادی از چشمه‌های فعال تراورتن ساز. الف) چشمه‌های قزل داغ ۲ و ۳، ب) چشمه تاپ تاپان، پ) چشمه جنوب کلوانق، ت) چشمه داشکسن ۲، ث) چشمه در بستر خشک دریاچه ارومیه (S12)، ج) چشمه داشکسن ۱

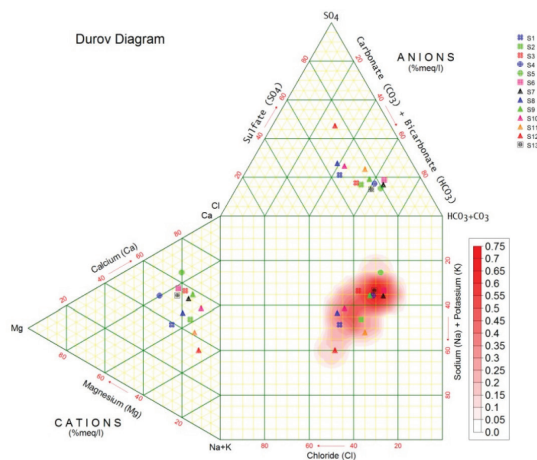
1. Piper diagram

این نمودار تیپ‌های مختلف هیدروشیمیایی و بعضی از فرآیندهای هیدروشیمیایی را بهتر از نمودار پایپر نشان می‌دهد. به همین منظور نمودار دوروف برای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه رسم شد (شکل ۴). تمامی نمونه‌های مربوط به چشمه‌های تراورتن ساز در قطر مربع نمودار دوروف قرار گرفته‌اند که معرف اختلاط می‌باشد (Al-Bassam et al., 1997). موقعیت متفاوت چشمه S12 نسبت به سایر چشمه‌ها، به احتمال زیاد ناشی از قرار گرفتن آن در بستر خشک دریاچه ارومیه و تاثیر پذیرفتن از رسوبات ژئوس دار بستر دریاچه باشد.

نمودار مثلثی دیگر، نمودار دوروف می‌باشد که بر اساس مجموع درصد آنیون‌ها و کاتیون‌ها به میلی-اکی والان بر لیتر رسم می‌شود. مقادیر آنیون‌ها و کاتیون‌ها در مثلث‌های مربوط ترسیم و سپس به مکان‌های مورد بررسی در مربع‌های اصلی امتداد داده می‌شوند. از مزایای نمودار دوروف نسبت به پایپر، نشان دادن بهتر تیپ‌های مختلف آبی و فرآیندهای هیدروشیمیایی مانند تبادل یونی و آمیختگی آبها با کیفیت‌های متفاوت است (Singhal & Gupta, 2010). نمودار دوروف به ۹ میدان تقسیم می‌شود که هر میدان بیان‌کننده تیپ‌های مختلف و فرایندهای خاص می‌باشد.



شکل ۳. نمودار پایپر چشمه‌های منطقه مورد مطالعه



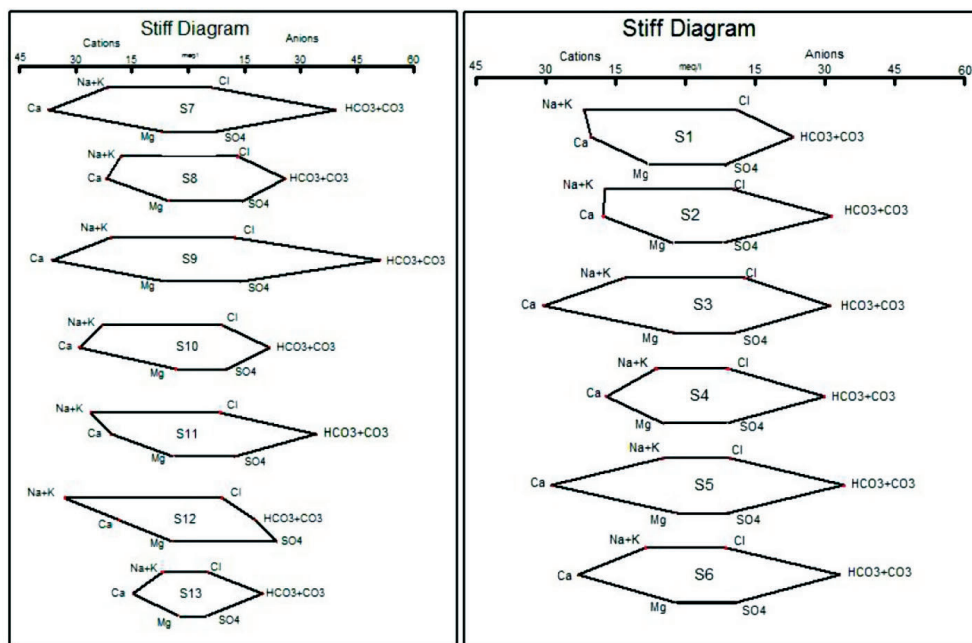
شکل ۴. نمودار دوروف برای چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. نتایج اندازه‌گیری‌های صحرایی (خرداد ماه ۹۶) و نتایج آنالیز شیمیایی چشمه‌های منطقه مورد مطالعه (اعداد بر حسب ppm می‌باشند)

شناسه	نام چشمه	EC (mS)	pH	TDS	T (°C)	Eh (mV)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	درصد خطا
S1	قرل داغ ۱	۴۰۳۰	۶/۸۱	۲۰۲۰	۲۱/۹	۲۴/۵	۴۸۱/۱۴۴	۳۳/۵۳۴	۹۷/۲۷۲	۴۰۶/۲۶۱	۱۴۲۰	۳۹۸/۴۲۹	۴۳۵/۱۳۲	۶/۹۳
S2	قرل داغ ۲	۴۹۱۰	۶/۷۲	۲۵۰۰	۲۲/۷	۲۷	۳۹۸/۰۵۴	۴۳/۶۳۳	۴۷/۴۸۸	۳۷۷/۹۸۳	۱۸۴۸	۳۲۲/۷۵۷	۳۳۶/۲۰۵	۵/۹۴
S3	قرل داغ ۳	۴۹۴۰	۶/۵۷	۲۴۸۰	۲۶/۵	۲۳/۹	۳۷۸/۳۷۳	۲۴/۳۶۳	۸۱/۷	۵۹۵/۷۰۸	۱۶۵۰	۳۰۶/۳۲۷	۳۲۷/۶۸۸	۱۵/۸
S4	تاپ تاپان ۱	۳۵۶۰	۶/۵۴	۱۷۷۰	۱۹/۴	۲۶/۲	۲۱۳/۳۹۸	۱۳/۸۵۶	۹۷/۷۲۷	۴۰۶/۲۶۱	۱۶۲۴	۲۱۰/۶۴۵	۲۶۲/۷۲۳	۰/۱۱
S5	تاپ تاپان ۲	۳۸۹۰	۶/۴	۱۹۴۰	۱۹/۱	۳۳/۳	۲۰۰/۲۲۱	۱۲/۵۹۲	۷۶/۰۳۸	۶۶۲/۳۹۳	۱۸۲۰	۱۹۵/۷۹۱	۲۴۷/۷۸۴	۸/۸
S6	کلوانق	۴۲۴۰	۶/۵۹	۲۱۲۰	۲۲/۱	۲۳/۷	۲۸۵/۶۰۵	۱۸۰/۷	۷۷/۰۹۱	۵۴۸/۱۵۶	۱۷۶۴	۱۵۷/۱۵۶	۳۱۶/۴۳۵	۷/۶۷
S7	داشکسن ۱	۴۸۰۰	۶/۴۷	۲۴۰۰	۱۸/۹	۲۹/۳	۴۵۳/۹۰۲	۶۵/۰۴	۸۲/۶۸۱	۷۴۲/۶۷۳	۲۴۰۰	۲۳۰/۹۹۸	۳۷۴/۴۸۷	۹/۷۶
S8	داشکسن ۲	۵۱۲۰	۶/۵۸	۲۵۶۰	۲۱/۴	۲۶/۳	۴۱۱/۶۴۶	۲۲/۵۰۳	۶۸/۳۸۷	۴۴۸/۳۴۷	۱۵۴۰	۴۵۰/۰۴۲	۶۶۷/۸۹۱	۵/۴۵
S9	داشکسن ۳	۴۷۵۰	۶/۵۵	۲۳۷۰	۲۰/۱	۲۵	۴۴۸/۳۴۹	۶۳/۹۲۶	۸۰/۰۲۶	۷۳۸/۲۱	۳۰۸۰	۴۲۲/۷۷۱	۶۳۴/۹۵۸	۷/۹۱
S10	داشکسن ۴	۴۹۰۰	۶/۵۵	۲۵۰۰	۱۹/۷	۲۳	۴۸۹/۶۶۱	۶۵/۳۸۷	۳۹/۹۴۳	۵۸۰/۱۵۸	۱۳۲۰	۲۲۴/۳۳۴	۲۹۴/۲۴۱	۱۴/۶۷
S11	داشکسن ۵	۴۰۵۰	۶/۴۱	۲۰۲۰	۱۷/۲	۳۲/۸	۵۸۰/۰۵۹	۳۰/۷۵	۴۹/۱۴۴	۴۱۱/۵۴۹	۲۰۸۰	۳۰۲/۱۴	۵۹۲/۲۳۲۵	۴/۱۳
S12	بستر دریاچه	۳۹۰۰	۶/۹	۲۰۱۰	۲۷	۴/۳	۷۲۶/۲۵۵	۲۹/۲۳۱	۴۳/۰۸۲	۳۵۶/۵۷۲	۱۱۲۰	۳۳۷/۳۷۹	۱۱۵۳/۷۰۴	۱/۶۹
S13	داشکسن ۶	۲۲۶۰	۶/۴۱	۱۱۳۰	۱۷/۵	۱۰	۱۸۰/۸۵۲	۵۰/۸۱	۴۵/۴۵۷	۳۱۶/۷۵۴	۱۱۴۰	۱۴۷/۵۳۹	۱۷۴/۰۱۴	۱/۹۷
S14	ولزید	۱۷۹۲	۷/۵۷	۰/۸۹۷	۱۶/۵	-۳۵	-	-	-	-	-	-	-	-

گرفته بی برد. مقایسه نمودار استیف نمونه‌های مورد آزمایش (شکل ۵) با نمودار استاندارد نشان می‌دهد که سنگ منشا اغلب نمونه‌ها سنگ آهک می‌باشد. این وضعیت با لیتولوژی واحدهای اطراف نهشته‌های تراورتن که اغلب آهک‌های ژوراسیک و کرتاسه می‌باشند سازگاری دارد. همچنین برخی از نمونه‌ها شباهت‌هایی با منشا آب دریا نشان می‌دهند (مانند S1 و S11 و S12) که می‌تواند ناشی از اختلاط آب‌های زیرزمینی با آب دریاچه و یا شورابه‌های مرتبط با آن باشد.

نمودار استیف: در این نمودار نتایج تجزیه شیمیایی برحسب میلی اکی والان بر لیتر (meq/l) بر روی خطوط افقی پیاده می‌شوند. با اتصال نقاط به‌دست‌آمده به هم شکل‌های مشخصی به وجود می‌آیند که از نظر مقایسه سریع تعداد زیادی نمونه‌ها، بسیار مفید است. برای رسم این نمودار از نرم‌افزار Rock Works 14 استفاده شده است. با مقایسه شکل حاصل از هر نمونه با نمودار استاندارد (Hounslow, 1995) می‌توان تا حد زیادی به نوع سازندهایی که نمونه آب از آن منشأ



شکل ۵. نمودار استیف چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

نسبت‌های یونی

و کاتیون‌های محلول در آب هستند، پی برد (Hounslow, 1995) (جدول ۲). نسبت‌های یونی برای تعیین قرابت شیمیایی و منشأ یون‌ها برای تمامی نمونه‌ها محاسبه شد (جدول ۳).

نسبت‌های یونی معرف‌های مناسبی برای بررسی شیمی منابع آب زیرزمینی و تعیین منشأ املاح است. با استفاده از نسبت‌های یونی می‌توان به نوع کانی‌هایی که منشأ آنیون‌ها

جدول ۲. تعیین سنگ منشأ یون‌های اصلی بر اساس نسبت‌های یونی (Hounslow, 1995)

پارامترها	مقدار	منشأ
$\frac{Na}{Na + Cl}$	>0.5	• منبع سدیم دیگری از هالیت-آلبیت، تبادل یونی
	$=0.5$	• انحلال هالیت
	$TDS > 500$	• تبادل یونی معکوس
	$50 < TDS < 500$	• خطای آنالیز
$\frac{Mg}{Ca + Mg}$	$TDS < 50$	• آب باران
	$=0.5$	• هوازدگی دولومیت
	<0.5	• هوازدگی سنگ دولومیت، سنگ آهک
	>0.5	• انحلال دولومیت، ته‌نشست کلسیت یا آب دریا
$\frac{Ca}{Ca + SO_4}$	$=0.5$	• انحلال ژپس
	$Ph < 5/5$	• اکسیداسیون پیریت
	$Ph(neutral)$	• حذف کلسیم-تبادل یونی یا رسوب کلسیم
	>0.5	• منبع کلسیم دیگری از ژپس-کربنات‌ها یا سیلیکات‌ها
$\frac{Cl}{Sum Anion}$	$TDS > 500$	• آب دریا، شورابه و یا تبخیر
	$TDS < 100$	• آب بارش
	<0.8	• هوازدگی سنگ
$\frac{Hco_3}{Sum Anion}$	>0.8	• هوازدگی سیلیکات یا کربنات
	<0.8 sulphate high	• انحلال ژپس
	<0.8 sulphate low	• شورابه یا آب دریا

جدول ۳. نتایج حاصل از محاسبه نسبت‌های یونی برای چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

	Na/Na+Cl	Mg/Mg+Ca	Ca/Ca+SO ₄	Cl/sum anion	HCO ₃ /sum anion	Cl/HCO ₃ +CO ₃
S1	۰/۶۵۰	۰/۲۸۲	۰/۶۹۱	۰/۲۵۷	۰/۵۳۴	۰/۴۸۲
S2	۰/۶۵۵	۰/۱۷۱	۰/۷۲۹	۰/۱۹۶	۰/۶۵۲	۰/۳۰۰
S3	۰/۶۵۵	۰/۱۶۲	۰/۸۳۵	۰/۲۰۳	۰/۶۳۶	۰/۳۱۹
S4	۰/۶۰۹	۰/۲۸۳	۰/۷۸۷	۰/۱۵۶	۰/۶۹۹	۰/۲۲۳
S5	۰/۶۱۱	۰/۱۵۹	۰/۸۶۴	۰/۱۳۶	۰/۷۳۶	۰/۱۸۵
S6	۰/۷۳۶	۰/۱۸۸	۰/۸۰۵	۰/۱۱۰	۰/۷۲	۰/۱۵۳
S7	۰/۷۵۱	۰/۱۵۵	۰/۸۲۶	۰/۱۲۱	۰/۷۳۳	۰/۱۶۵
S8	۰/۵۸۵	۰/۲۰۰	۰/۶۱۶	۰/۲۴۴	۰/۴۸۶	۰/۵۰۲
S9	۰/۶۲۰	۰/۱۵۱	۰/۷۳۵	۰/۱۵۷	۰/۶۶۷	۰/۲۳۶
S10	۰/۶۹۹	۰/۱۰۱	۰/۷۳۷	۰/۲۲۲	۰/۵۲۶	۰/۴۲۲
S11	۰/۷۴۷	۰/۱۶۴	۰/۶۲۴	۰/۱۵۵	۰/۶۲۰	۰/۲۴۹
S12	۰/۷۶۸	۰/۱۶۶	۰/۴۲۵	۰/۱۸۳	۰/۳۵۳	۰/۵۱۸
S13	۰/۶۵۳	۰/۱۹۱	۰/۸۱۳	۰/۱۵۷	۰/۷۰۵	۰/۲۲۲

۳. نمودارهای ترکیبی که بر اساس غلظت یون‌های اصلی در برابر غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها استوار می‌باشد.
 ۴. تهیه مقاطع عمود بر ساحل دریا که تغییرات کیفی آب را نشان می‌دهد. این روش برای تعیین موقعیت کلی سطح مشترک آب‌شور و شیرین نیز مفید می‌باشد. پروفیل‌های ژئوفیزیک ارائه شده در این پژوهش، نمونه‌ای از این پروفیل‌ها می‌باشد.

روش رول: روش رول (Revelle, 1941) معیار خوبی برای ارزیابی و تشخیص اختلاط آب‌های زیرزمینی با آب دریا یا آب‌های فسیلی است. این روش بر اساس رابطه (۱) استوار می‌باشد:

$$\text{Cl}/\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} \quad (1)$$

یون‌های بی‌کربنات و کربنات معمولاً فراوان‌ترین یون‌های موجود در آب‌های زیرزمینی هستند و در آب دریا به مقدار جزئی وجود دارند، در مقابل مقدار یون کلر در آب دریا بیش از یون‌های دیگر است اما در آب‌های زیرزمینی معمولاً کم است. بنابر نظر رول افزایش نسبت یون کلرید به مجموع یون‌های بی‌کربنات و کربنات می‌تواند دلیل خوبی بر نفوذ آب‌های شور دریا در آبخوان‌های ساحلی باشد.

بر اساس مقادیری که در جدول ۳ ارائه شده است، میزان اندیس رول در چشمه‌های S1، S2، S3، S8 و S12 بالاترین مقدار را نشان می‌دهند. مقدار بالای اندیس رول در این چشمه‌ها که در مجاورت گسل‌ها و یا سیستم‌های شکستگی قرار دارند، می‌تواند نشانگر جریان و تداخل آب دریاچه و یا شورابه‌های مرتبط با دریاچه از طریق این گسل‌ها باشد. بر اساس (Singhal and Gupta, 2010)، این گسل‌ها به‌عنوان مجرا عمل کرده و موجب هدایت شورابه‌ها به سمت چشمه‌ها شده است.

روش سیکدار: در روش سیکدار (Sikdar et al., 2001) با توجه به آنیون و کاتیون‌های اصلی، رخساره‌های آب شیرین، ترکیبی و شور در آبخوان‌های ساحلی و مناطق برخورد با لایه‌های آب‌شور تعیین می‌شود.

۱. رخساره آب شیرین: در این رخساره میزان یون

بررسی مقادیر حاصل از محاسبه نسبت‌های یونی برای چشمه‌های منطقه، در ذیل آورده شده است:

- در تمامی نمونه‌ها، مقدار نسبت $\text{Na}/\text{Na}+\text{Cl}$ بیش از ۰/۵ است که حاکی از تبادل یونی می‌باشد.
- نسبت $\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Ca}$ در تمام نمونه‌های آنالیز شده کمتر از ۰/۵ است که انحلال دولومیت و کلسیت را نشان می‌دهد و با لیتولوژی کارستی منطقه که عمدتاً سنگ‌های آهکی کرتاسه و ژوراسیک می‌باشد، کاملاً تطابق نشان می‌دهد.
- نسبت‌های یونی $\text{Ca}/\text{Ca}+\text{SO}_4$ در تمامی نمونه‌ها بیشتر از ۰/۵ می‌باشد.
- مقادیر نسبت‌های $\text{Cl}/\text{sum anion}$ در تمام نمونه‌ها کمتر از ۰/۸ است که معرف هوازدگی و یا انحلال سنگ می‌باشند.
- مقدار نسبت $\text{HCO}_3/\text{sum anion}$ در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۰/۸ می‌باشد. مقدار پایین سولفات نشان می‌دهد که این نسبت‌ها مربوط به شورابه یا آب دریا می‌باشد. ولیکن مقدار بالای سولفات در نمونه S12 احتمالاً در اثر قرار گرفتن این چشمه در بستر خشک دریاچه و ناشی از انحلال ژیبس موجود در رسوبات اطراف آن می‌باشد.

بررسی نفوذ آب‌شور دریاچه به سنگ‌های سخت و آهکی منطقه

با توجه به نتایج حاصل شده از بررسی نمودارهای پایپر و دوروف و نیز نسبت‌های یونی برای چشمه‌های مورد مطالعه، که نشان‌دهنده اختلاط با آب‌های شور می‌باشند و با در نظر گرفتن اینکه محدوده مطالعاتی در مجاورت دریاچه ارومیه قرار دارد، در این نوشتار جهت بررسی احتمال نفوذ آب‌شور به سنگ‌های آهکی و تراورتن‌های مجاور، از روش‌های تشخیص نفوذ آب‌شور استفاده شده مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از:

۱. نسبت رول که بر پایه نسبت غلظت یون کلر به مجموع یون‌های کربنات و بی‌کربنات استوار است.
۲. تعیین رخساره‌های آب شیرین تا شور به روش سیکدار

پهنه جنوب شرقی، که در این نوشتار گسل شیرامین نامیده شده است، نشان می‌دهد که این پهنه گسلی دارای حرکت امتدادلغز راستگرد می‌باشد (شکل ۷). پهنه گسلی شیرامین که در واقع انتهای شمال غربی گسل مراغه (Taghipour et al., 2018) می‌باشد، با روند $E^{\circ}N145^{\circ}$ طولی قریب به ۲۵ کیلومتر و عرض ۱۵۰ تا ۵۰۰ متر دارد. پدیده‌های ژئومورفیک جوان مانند انحراف آبراهه‌ها موید حرکات فعال و جوان بر روی این پهنه گسلی می‌باشند. با استفاده از بازسازی آبراهه‌های منحرف شده و جایجا شده، حداکثر میزان جایجایی امتدادلغز راستگرد به میزان ۲۵۰ متر محاسبه شده است (شکل ۸).

عملکرد خاص و چندگانه پهنه گسلی در این بخش موجب هدایت سیالات منشا گرفته از مجموعه سهند و نهشت تراورتن شده است. از سویی حرکات گسل باعث قرار گرفتن واحدها با لیتولوژی متفاوت شده است. به طوری که واحدهای شیلی کرتاسه در مجاورت سازندهای آهکی قرار گرفته و به صورت سد^۲ در برابر جریان عمل می‌کنند (Caine et al., 1996). در نتیجه بخشی از سیالات اشباع از بی‌کربنات از پهنه گسلی تراوش کرده و باعث رسوب‌گذاری تراورتن در پهنه گسلی شده است (شکل ۸ و ۹). از سوی دیگر با فعالیت و حرکت پهنه گسلی، این سیالات در امتداد پهنه گسلی جریان یافته و پهنه گسلی به عنوان معبر و کانال^۳ برای سیالات عمل کرده است (Gudmundsson et al., 2003). این سیالات ضمن جریان در سیستم‌های شکستگی موجب انحلال بیشتر واحدهای آهکی ژوراسیک و کرتاسه شده‌اند. وجود حفرات کارستی متعدد در این واحدها شاهدهی بر این مدعا است (شکل ۱۰).

با فعالیت گسل‌های امتدادلغز، شکستگی‌های کششی در پهنه همپوشانی این گسل‌ها ایجاد می‌شوند. ایجاد شکستگی‌های کششی، موجب شکل‌گیری فضای خالی و مناسب برای فرار سیالات و بالا آمدن آنها به سطح زمین و ایجاد چشمه‌ها و پشته‌های تراورتن ساز می‌شود. البته لازم به ذکر است که تجزیه بی‌کربنات محلول در آب به دلیل افت

بی‌کربنات بسیار بیشتر از یون کلر می‌باشد و میزان Mg و Ca نسبت به سایر کاتیون‌ها بیشتر است. مقدار کل مواد جامد محلول این آب‌ها بین ۲۱۰ تا ۷۵۵ میلی‌گرم بر لیتر است. این آب‌ها، معمولاً به لحاظ سختی در رده سبک قرار دارند و نسبتاً شیرین و قابل شرب می‌باشند. ۲. رخساره ترکیبی: کیفیت این تیپ در مقایسه با تیپ آب شیرین پایین‌تر است. در این آب‌ها غلظت یون کلر نسبت به رخساره آب‌های شیرین افزایش می‌یابد. مقدار کل مواد جامد محلول در آب‌های ترکیبی، از ۵۰۰ تا ۹۵۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. این رخساره از نظر سختی جزو آب‌های سخت است و مقدار بی‌کربنات آن مشابه آب‌های شیرین می‌باشد.

۳. رخساره آب‌شور: شامل رده Ca-Mg-Cl است، در این تیپ مقدار کلرید افزایش قابل توجهی دارد در حالی که غلظت بی‌کربنات مشابه با تیپ‌های فوق است. مقدار کل مواد جامد محلول در آب‌های ترکیبی، از ۷۷۰ تا ۲۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است و سختی بالایی (بیش از ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر برحسب بی‌کربنات کلسیم) دارند.

نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌ها، نمودارها و اندازه‌گیری‌های برجا نشان می‌دهد که اغلب نمونه‌ها در رخساره ترکیبی قرار دارند ولیکن تعدادی از نمونه‌ها مانند S1، S2 و S3 در رخساره آب‌شور قرار دارند.

کنترل‌کننده‌های ساختاری در منطقه

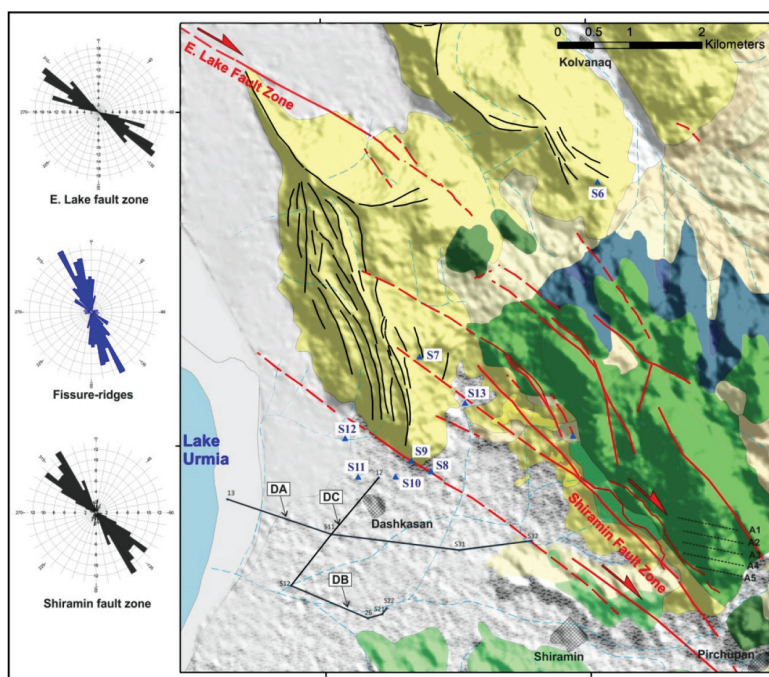
در منطقه مورد مطالعه همپوشانی گسل‌های امتدادلغز باعث ایجاد تراکشش^۱ و تشکیل این تیپ از نهشته‌ها شده است. بهترین ارتباط بین پشته‌های تراورتن و ساختارهای مجاور در مجموعه داشکسن (جنوب منطقه مورد مطالعه) قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۶). مجموعه داشکسن که متشکل از پشته‌هایی با روند عمومی NNW-SSE و ارتفاع تقریباً ۱۵۰ متر (نسبت به دشت مجاور) می‌باشد، به‌وسیله دو پهنه گسلی با امتداد NW-SE که آرایش پلکانی و راست-پله (Right-stepping) نسبت به هم دارند، احاطه شده است. مطالعات صحرایی و اندازه‌گیری صفحات گسلی در

1. Transtension
2. Barrier
3. Conduit

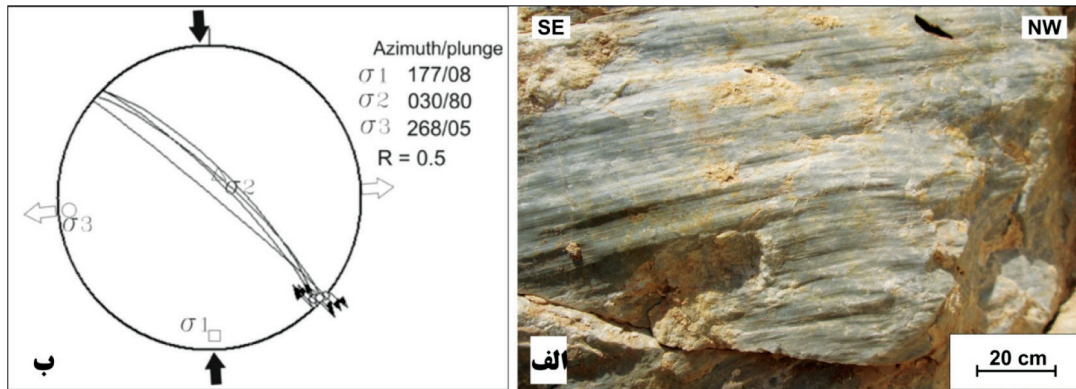
آب‌شور از طریق سیستم‌های گسلی به پهنه کشتی داشکسن شده است. از جمله پروفیل DA که عمود بر ساحل دریاچه برداشت شده است ارتباط با دریاچه را به خوبی نشان می‌دهد. شایان ذکر است که وجود این آنومالی‌ها با نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در منطقه (شارمد و همکاران، ۱۳۹۴) همخوانی دارد. نتایج حاصل از آنالیزهای شیمیایی و اندازه‌گیری‌های برج‌ها در مجموعه داشکسن با نتایج مطالعات ژئوفیزیک همخوانی دارند. به طوری با حرکت از سمت شرق به سمت غرب، میزان هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین میزان نسبت‌های یونی که معرف اختلاط با آب‌شور می‌باشد، افزایش می‌یابد (شکل ۱۲). در این منطقه، بیشترین مقدار EC و نسبت‌های یونی معرف اختلاط با آب‌شور، در چشمه S8 دیده می‌شود. این چشمه در محل تلاقی دو گسل قرار دارد و این وضعیت می‌تواند نشان‌دهنده نقش سیستم‌های شکستگی در هدایت و اختلاط آب‌های زیرزمینی با ترکیب متفاوت باشد.

فشار در این شکستگی‌ها و آزاد شدن گاز دی‌اکسید کربن، حرکت رو به بالای سیالات در امتداد شکستگی‌های کشتی را تسهیل می‌کند، فرایندی که موجب جوشش آب و خروج گاز از چشمه‌های تراورتن ساز می‌شود (شکل ۲). تداوم فعالیت گسل‌های امتدادلغز، موجب جریان مداوم سیالات در پهنه گسلی و خروج آنها از شکستگی‌های کشتی شده و باعث شکل‌گیری نهشته‌های وسیع و بی‌نظیر شکاف-پشته در منطقه شده است.

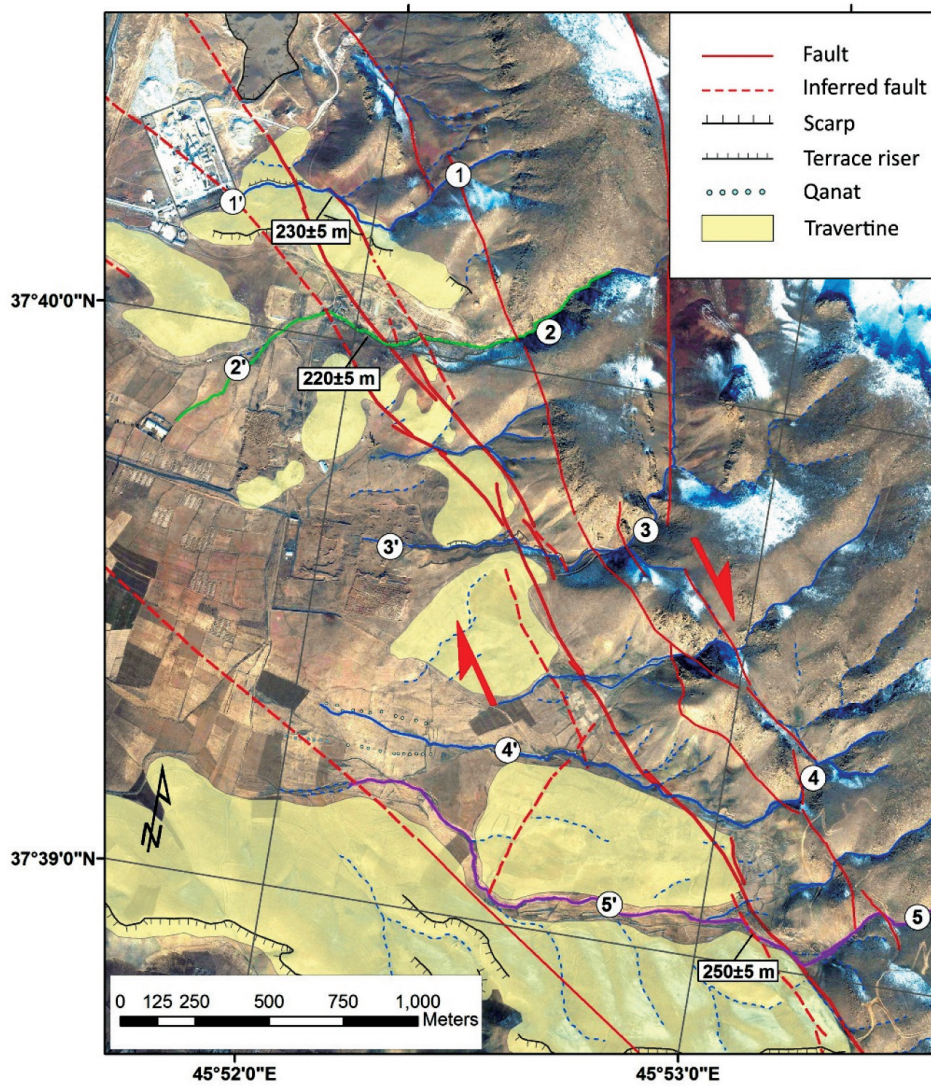
بررسی پروفیل‌های ژئوالکتریک در مجموعه جنوب مجموعه داشکسن، وجود پهنه‌های با مقاومت الکتریکی بسیار پایین را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). پهنه‌های با مقاومت الکتریکی پایین (کمتر از ۳ اهم متر) از جنوب غرب مجموعه داشکسن شروع شده و تا جنوب مجموعه ادامه دارند. از نظر عمقی نیز این آنومالی‌ها تا عمق ۳۰۰ متری توسعه دارند. با توجه به نفوذ آب‌شور به آب‌های زیرزمینی در این منطقه و شور شدن چاه‌های آب در منطقه شیرامین و مناطق مجاور مجموعه داشکسن، به احتمال زیاد این آنومالی‌ها ناشی از نفوذ



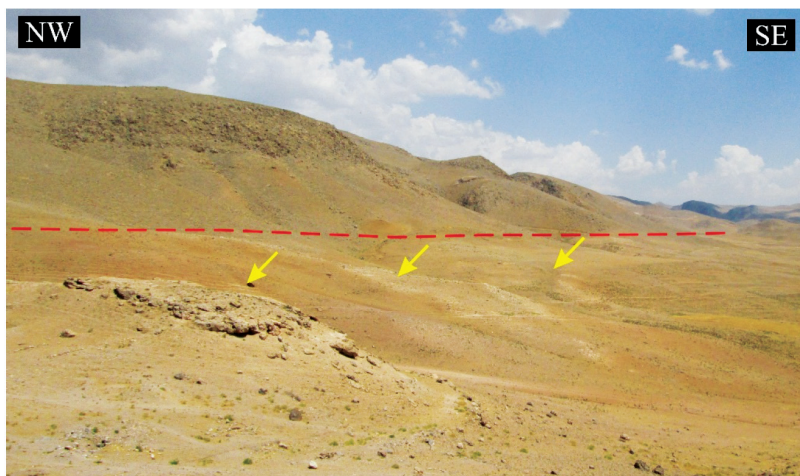
شکل ۶. نقشه ساختاری و زمین‌شناسی مجموعه داشکسن که بر روی تصویر SRTM پیاده شده است. مجموعه داشکسن در پهنه همپوشانی گسل امتدادلغز شیرامین و گسل شرق دریاچه ارومیه تشکیل شده است. رزیدیاگرام‌ها در سمت چپ، به ترتیب از بالا به پایین مربوط به گسل‌های شرق دریاچه، شکاف-پشته‌ها و شکستگی‌های کشتی در مجموعه داشکسن و گسل‌ها در پهنه گسلی شیرامین می‌باشند. مثلث‌های آبی‌رنگ موقعیت چشمه‌ها را نشان می‌دهند. موقعیت پروفیل‌های ژئوالکتریک در جنوب مجموعه داشکسن (DA تا DC) با خطوط سیاه مشخص شده است



شکل ۷. الف) صفحه گسلی حاوی خطوط خراش در امتداد پهنه گسلی شیرامین، ب) استریوگرام صفحات گسلی در امتداد پهنه گسلی شیرامین



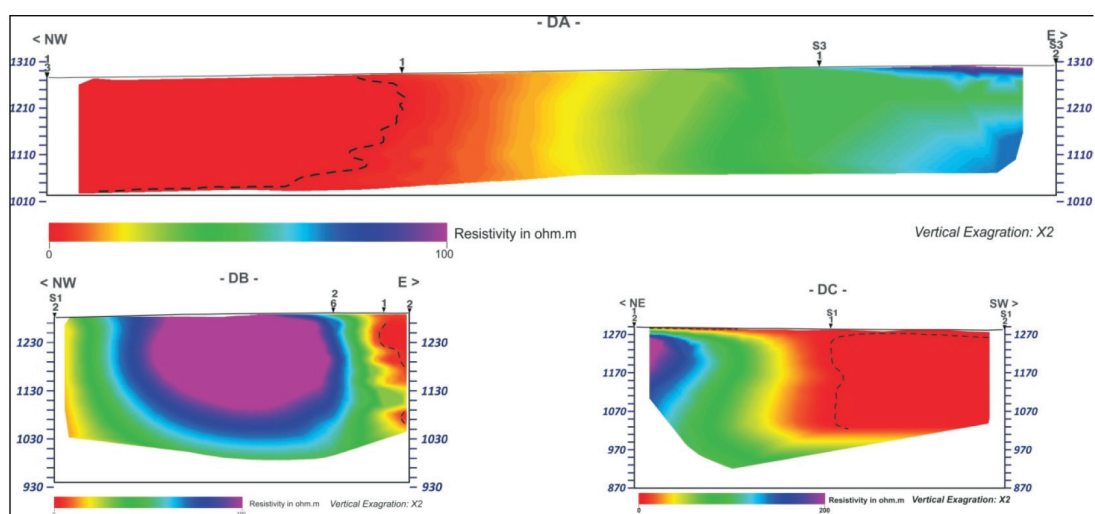
شکل ۸. نقشه مورفوتکتونیک پهنه گسلی شیرامین. نهشته‌های تراورتن با رنگ زرد مشخص شده‌اند. آبراهه‌های متناظر در دو سوی پهنه گسلی با رنگ و شماره یکسان نشان داده شده‌اند



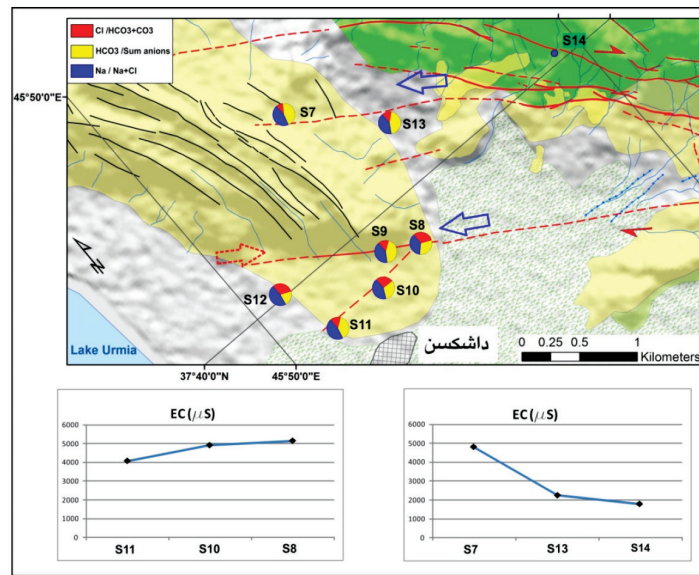
شکل ۹. نهشته‌های تراورتن (پیکان‌های زرد رنگ) در امتداد پهنه گسلی شیرامین



شکل ۱۰. حفرات کارستی در سازندهای آهکی کرتاسه در امتداد پهنه گسلی شیرامین



شکل ۱۱. پروفیل‌های ژئوالکتریک در مجاورت مجموعه داشکسن. خطوط خطچین، کنتور مقاومت الکتریکی ۳ اهم‌تر را نشان می‌دهند. موقعیت پروفیل‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است



شکل ۱۲. نقشه تغییرات نسبت‌های یونی در چشمه‌های مجموعه داشکسن که بر روی نقشه زمین‌شناسی پیاده شده است. پیکان‌های آبی رنگ مسیر تقریبی جریان آب زیرزمینی و پیکان قرمز رنگ مسیر احتمالی جریان آب‌شور را نشان می‌دهند. نمودارها روند تغییرات EC را در فاصله بین چشمه‌ها نشان می‌دهند

شده و در زیر مجموعه ادامه دارند (شکل ۱۴). این پهنه‌ها در شرق این مجموعه وجود ندارند ولیکن به سمت غرب و دریاچه ارومیه توسعه دارند. از نظر عمقی نیز این آنومالی‌ها تا عمق ۳۰۰ متری در زیرمجموعه قزل داغ توسعه دارند. با توجه به نفوذ آب‌شور به آب‌های زیرزمینی در این منطقه و شور شدن چاه‌های آب در مجاور مجموعه، به احتمال زیاد این آنومالی‌ها ناشی از نفوذ آب‌شور از طریق سیستم‌های گسلی به پهنه کششی قزل داغ شده است. شایان ذکر است که وجود این آنومالی‌ها با نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیکی سازمان زمین‌شناسی در منطقه (شارمد و همکاران، ۱۳۹۴) همخوانی دارد. عامل دیگری که می‌تواند باعث کاهش مقاومت الکتریکی در این پهنه شود، وجود محتوای بالای (شار) گاز CO_2 در آب‌های زیرزمینی موجود در پهنه‌های گسلی این منطقه است (Byrdina et al., 2014).

نتایج حاصل از آنالیزهای شیمیایی و اندازه‌گیری‌های برجا در مجموعه قزل داغ نیز با نتایج مطالعات ژئوفیزیک همخوانی دارند. به طوری با حرکت از سمت شرق به سمت غرب، میزان هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها افزایش می‌یابد.

از نظر ساختاری مشابه وضعیتی که در مجموعه داشکسن وجود دارد، در سایر بخش‌های منطقه مورد مطالعه، به ویژه مجموعه قزل داغ در شمال منطقه مورد مطالعه نیز وجود دارد. ولیکن به دلیل ساخت‌وسازها و مهم‌تر از آن به دلیل پوشش گیاهی که اطراف این مجموعه را دربرگرفته است، امکان بررسی دقیق ساختارها وجود ندارد. با این حال بر اساس پردازش داده‌های DEM و تصاویر ماهواره‌ای، موقعیت گسل‌های احتمالی مجاور این مجموعه و بخش‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه، شناسایی شده است (شکل ۱۳). در این منطقه همپوشانی گسل‌های شرق و غرب قزل داغ با روند تقریبی $N120^{\circ}E$ ، موجب ایجاد تراکشش شده و شرایط را برای ایجاد شکستگی‌های کششی و بالا آمدن سیالات اشباع از بی‌کربنات فراهم کرده است. گسل غرب قزل داغ در سمت غرب، به پهنه گسلی شرق دریاچه ارومیه می‌پیوندد که موجب جابجایی راستگرد شاخه‌های دلتایی رودخانه آجی چای شده است (Taghipour et al., 2018). بررسی پروفیل‌های ژئوالکتریک در مجموعه قزل داغ نیز وجود پهنه‌های با مقاومت الکتریکی بسیار پایین را نشان می‌دهد. پهنه‌های با مقاومت الکتریکی پایین (کمتر از ۳ اهم‌متر) از شرق مجموعه قزل داغ شروع

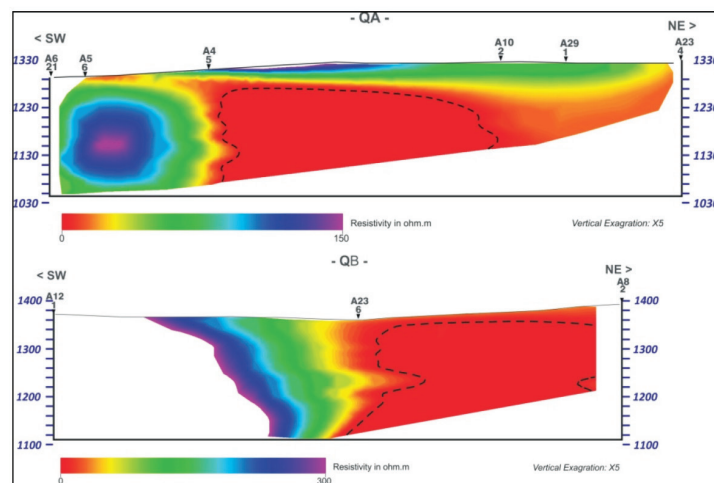
نداشته و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی متفاوتی دارند. با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده در این پژوهش، مدل هیدروژئولوژیک سه بعدی برای نشان دادن رابطه عوامل مختلف زمین‌شناسی و ساختاری در منطقه ارائه شده است (شکل ۱۶). عملکرد پهنه‌های گسلی امتدادلغز به عنوان کانال، موجب هدایت آب‌های زیرزمینی از ارتفاعات به سمت دشت مجاور و دریاچه ارومیه شده است. کشش ایجاد شده در پهنه همپوشانی گسل‌ها موجب افت فشار شده و شرایط را برای بالا آمدن آب‌های زیرزمینی در امتداد شکستگی‌های کششی فراهم می‌کند. از سوی دیگر پیشروی و نفوذ آب شور دریاچه به سمت شرق می‌تواند از طریق سیستم‌های

همچنین میزان نسبت‌های یونی که معرف اختلاط با آب شور می‌باشد، افزایش می‌یابد (شکل ۱۵).

میزان نسبت‌های یونی و نیز دمای متفاوت در چشمه‌های نزدیک به هم، مانند چشمه‌های S8 و S9 در مجموعه داشکسن و چشمه‌های S2 و S3 در مجموعه قزل داغ، نشان می‌دهد که منشأ این چشمه‌ها از آبخوان‌های متفاوتی می‌باشد. حفاری‌های انجام یافته در جنوب مجموعه داشکسن که به منظور اکتشاف سنگ‌های تزئینی تراورتن و اونیکس انجام یافته، این پدیده را تایید می‌کند. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که لایه‌های نفوذناپذیر اونیکس موجب تشکیل سفره‌های تحت فشار متعدد شده‌اند که با یکدیگر ارتباط



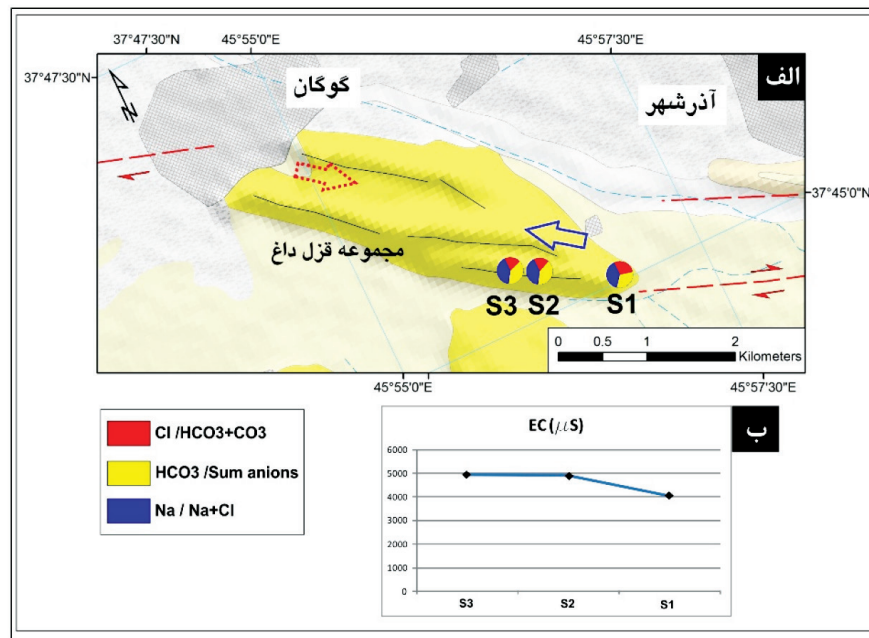
شکل ۱۳. نقشه ساختاری و زمین‌شناسی مجموعه قزل داغ که در پهنه همپوشانی گسل‌های امتدادلغز شرق و غرب قزل داغ تشکیل شده است. مثلث‌های آبی رنگ موقعیت چشمه‌ها را نشان می‌دهند. موقعیت پروفیل‌های ژئوالکتریک در مجاورت مجموعه قزل داغ (QA و QB) با خطوط سیاه مشخص شده است



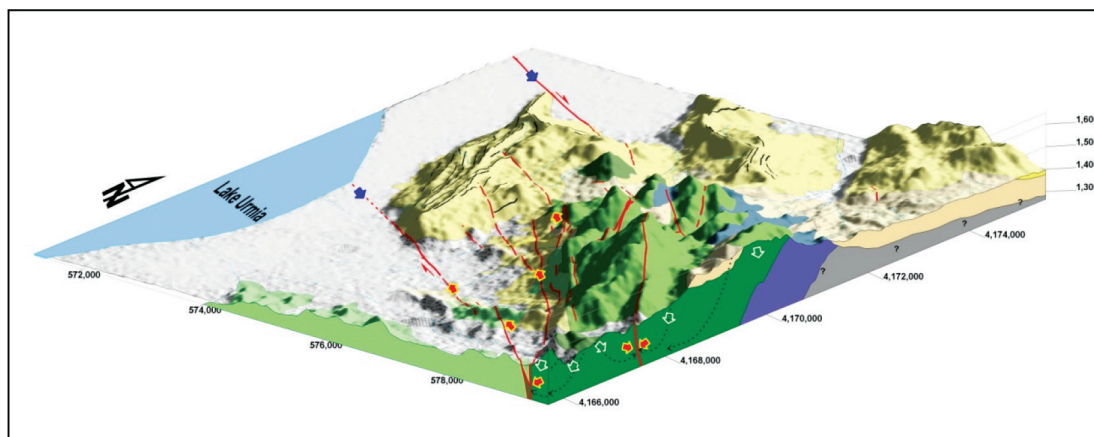
شکل ۱۴. پروفیل‌های ژئوالکتریک در مجاورت مجموعه قزل داغ. خطوط خط‌چین، کنتور مقاومت الکتریکی ۳ اهم‌تر را نشان می‌دهند. موقعیت پروفیل‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است

چشمه‌ها و محل تغذیه که در ارتفاعات مجاور (دامنه‌های سهند) قرار دارد، تامین می‌شود. آزاد شدن گاز در اثر تجزیه بی‌کربنات در امتداد شکستگی‌ها نیز یک عامل کمکی برای بالا آمدن و جوشش آب در این چشمه‌ها می‌باشد. مدل ارائه شده ارتباط هیدرولیکی دریاچه ارومیه و منابع آبی سازند سخت در شرق دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد.

شکستگی نیز صورت بگیرد. محیط کشتی ایجاد شده در پهنه همپوشانی گسل‌ها می‌تواند فضای مناسبی را برای نفوذ و هجوم آب‌های شور ایجاد کند. در واقع این محیط محل تلاقی و اختلاط دو نوع آب شیرین کربناته و آب‌شور کلروره شده است. بخش عمده‌ای از انرژی لازم برای بالا آمدن آب زیرزمینی در امتداد شکستگی، توسط اختلاف تراز مظهر



شکل ۱۵. الف) نقشه تغییرات نسبت‌های یونی در چشمه‌های مجموعه قزل داغ که بر روی نقشه زمین‌شناسی پیاده شده است. پیکان آبی رنگ مسیر تقریبی جریان آب زیرزمینی و پیکان قرمز رنگ مسیر احتمالی جریان آب‌شور را نشان می‌دهد، ب) نمودار، روند تغییرات EC را در فاصله بین چشمه‌ها نشان می‌دهد



شکل ۱۶. مدل هیدروژئولوژیک سه‌بعدی که از تلفیق نقشه زمین‌شناسی و داده‌های DEM تهیه شده است. پیکان‌های سفید مسیر جریان آب‌های جوی در اثر ثقل را نشان می‌دهند. پیکان‌های قرمز مسیر جریان سیالات در پهنه‌های گسلی و پیکان‌های آبی مسیر احتمالی جریان شورابه‌ها در پهنه‌های گسلی را نشان می‌دهند

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج اندازه‌گیری دما و PH و با در نظر گرفتن تیپ نهشته‌های تراورتن که از نوع شکاف-پشته می‌باشند، چشمه‌های تراورتن ساز منطقه از نوع ترموزن (Thermogene) با منشا هیدروترمال می‌باشند. چشمه‌های تراورتن ساز در محل همپوشانی گسل‌های امتداد لغز و تراکشش ناشی از آن ایجاد شده‌اند. کشش محلی در این زون‌ها باعث ایجاد شکستگی‌های کششی شده و موجب بالا آمدن سیالات اشباع از بی‌کربنات و نهشت تراورتن می‌شوند.

بررسی نمودارهای هیدروژئوشیمیایی مانند نمودارهای پایپر و دوروف نشان می‌دهد که آب چشمه‌ها اختلاط یافته‌اند که یکی از منابع، اختلاط با آب‌های جوی می‌باشد. ولیکن میزان نسبت‌های یونی و بالا بودن یون‌های سدیم و کلر نشان دهنده اختلاط آب چشمه‌ها با آب شور نیز می‌باشد. مجاورت چشمه‌های تراورتن ساز با دریاچه ارومیه و نتایج مطالعات ژئوفیزیکی و پروفیل‌های ژئوالکتریک که در مجاورت این چشمه‌ها برداشت شده‌اند، نفوذ آب شور دریاچه ارومیه و یا شورابه‌های مرتبط با آن را در پهنه‌های زیر این چشمه‌ها و زیر مجموعه‌های تراورتن را تایید می‌کنند. باین حال برای تعیین دقیق‌تر منشا اختلاط آب‌ها در منطقه، مطالعات ایزوتوپی پیشنهاد می‌شود.

منابع

- دانشگاه پیام نور، ۳۷۶.
- قدیرزاده، ا.، ۱۳۸۱. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ آذرشهر. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Alavi, M., 1994. Tectonic of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229, 211-238.
- Al-Bassam, A.M., Awad, H.S. and Al-Alawi, J.A., 1997. Durov Plot: A computer program for processing and plotting hydrochemical data. *Ground Water*, 35, 362-367.
- Altunel, E., 2005. Travertines: neotectonic indicators. In: Ozkul, M., Yagiz, S., Jones, B., (eds). *Travertine. Proceedings of 1st International Symposium on Travertine, September 21-25, 2005, Denizli-Turkey*, 120-127, Kozan Ofset, Ankara.
- Altunel, E. and Hancock, P.L., 1993. Active fissuring and faulting in Quaternary travertines at Pamukkale, western turkey. *Zeitschrift für Geomorphologie (Z Geomorph NF)*, 94, 285-302.
- Atabey, E., 2002. The formation of fissure-ridge type laminated travertine-tuff deposits microscopic characteristics and diagenesis, Kirşehir, central Anatolia. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 123-124, 59-65.
- Bargar, K.E., 1978. Geology and thermal history of Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park. *Bulletin of the United States Geological Survey*, 1444, 1-55.
- Byrdina, S., Vandemeulebrouck, J., Cardellini, C., Legaz, A., Camerlynck, C., Chiodini, G., Lebourg, T., Letort, J., Motos, G., Carrier, A. and Bascou, P., 2014. Relations between electrical resistivity, carbon dioxide flux, and self-potential in the shallow hydrothermal system of Solfatarà (Phlegrean Fields, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 283, 172-183.
- تقی‌پور، ک. و عباسی، م.، ۱۳۸۴. تراویتونیک: کاربرد نهشته‌های تراورتن در تکتونیک فعال. بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۶-۵۷.
- تقی‌پور، ک. و محجل، م.، ۱۳۹۲. ساختار و نحوه تشکیل پشته‌های تراورتن در منطقه آذرشهر، آذربایجان، شمال باختر ایران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۲۵، ۱۵-۳۳.
- شارمد، ت.، حسینی، س. ع. و محمدزاده، س.، ۱۳۹۴. گزارش هیدروژئوشیمی محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر، شیرامین، عجب‌شیر و مراغه. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۶۵.
- صداقت، م.، ۱۳۷۸. زمین و منابع آب، انتشارات

182. DOI:10.1016/j.jvolgeores.2014.07.010.
- Caine, J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028.
 - Chafetz, H.S. and Folk, R.L., 1984. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 289-316.
 - Dilsiz, C., 2006. Conceptual hydrodynamic model of the Pamukkale hydrothermal field, southwestern Turkey, based on hydrochemical and isotopic data. *Hydrogeology Journal*, 14, 562-572.
 - Ford, T.D. and Pedley, H.M., 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth Science Review*, 41, 117-175.
 - Guo, L. and Riding, R., 1998. Hot-spring travertine facies and sequences, late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy. *Sedimentology*, 45, 163-180.
 - Gudmundsson, A., Gjesdal, O., Brenner, S.L. and Fjeldskaar, I., 2003. Effects of linking up of discontinuities on fracture growth and groundwater transport. *Hydrogeology Journal*, 11, 84-99. doi:10.1007/s10040-002-0238-0.
 - Hancock, P.L., Chalmers, R.M.L., Altunel, E. and Çakir, Z., 1999. Travertines in active fault studies. *Journal of Structural Geology*, 21, 903-916.
 - Hounslow, A.W., 1995. *Water quality data: analysis and interpretation*. CRC Press LLC, 416.
 - Liu, Y., Zhou, X., Fang, B., Zhou, H. and Yamanaka, T., 2012. A preliminary analysis of the formation of travertine and travertine cones in the Jifei hot spring, Yunnan, China. *Environment Earth Sciences*, 66:1887-1896.
 - Pantecost, A., 2005. *Travertine*. Springer Publications, 445.
 - Sikdar, P. K., Sarkar, S. S. and Palchoudhury, S., 2001. Geochemical evolution of groundwater in the Quaternary Aquifers of Calcutta and Howrah, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19, 579-594.
 - Singhal, B.B.S. and Gupta, R.P., 2010. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Springer, 408.
 - Taghipour, K., Khatib, M.M., Heyhat, M., Shabaniyan, E. and Vaezihir, A., 2018. Evidence for distributed active strike-slip faulting in NW Iran: The Maragheh and Salmas fault zones. *Tectonophysics*, 742-743, 15-33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.022>.