

نقش چینه‌شناسی در کمیت و کیفیت آب چشمه‌های کارستی رشته‌کوه شتری، غرب طبس

حسن ضیاء، دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود*

غلامحسین کرمی، دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

عزیزاله طاهری، استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

رشته‌کوه شتری با مساحتی حدود ۲۵۰۰ کیلومتر مربع در غرب شهر طبس واقع شده است. سازندهای کربناته جمال، شتری و اسفندیار، ۵۳٪ این منطقه را تشکیل می‌دهند. توالی چینه‌شناسی و اختلاف هیدرواستراتوگرافی، تشکیل سه آبخوان کارستی جمال، شتری و اسفندیار در این رشته‌کوه را سبب شده است. ۸۳٪ چشمه‌های موجود در این رشته‌کوه، بیشتر از آبخوان‌های کارستی تخلیه می‌شوند. گسترش وسیع‌تر سازند اسفندیار نسبت به سازندهای جمال و شتری، ضخیم‌لایه بودن و خلوص بالاتر سنگ‌آهک در این سازند، توسعه بیشتر کارست در آن را موجب شده است؛ به طوری که بزرگ‌ترین چشمه‌های موجود در این منطقه از این سازند تخلیه می‌شوند. چینه‌شناسی منطقه علاوه بر کمیت بر کیفیت آب خروجی از چشمه‌های منطقه تأثیر به‌سزایی داشته است. چشمه‌های تخلیه‌شده از سازند اسفندیار با سطح اساس ولکانیکی و سازند قلعه‌دختر نسبت به چشمه‌های تخلیه‌شده از سازند اسفندیار با سطح اساس بغم‌شاه کیفیت مطلوب‌تری دارند. هدایت الکتریکی آب چشمه‌های گروه اول کمتر از ۶۰۰ و گروه دوم از ۶۰۰ تا ۱۸۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است.

واژه‌های کلیدی: چینه‌شناسی، کارست، کوه شتری، چشمه‌های کارستی

مقدمه

کارست حاصل انحلال سنگ‌های با قابلیت انحلال بالا در آب طبیعی، مانند سنگ‌های کربناته است. سنگ‌آهک مهم‌ترین سنگی است که فرایند کارستی شدن در آن مؤثر بوده است و قابلیت ذخیره‌سازی آب و تشکیل آبخوان را دارد. بیش از ۲۵٪ از جمعیت جهان روی مناطق کارستی زندگی می‌کنند یا آب موردنیاز خود را از منابع کارستی تأمین می‌کنند (Ford and Williams 2007). در ایران حدود ۱۱٪ از سطح کل کشور را سازندهای آهکی تشکیل می‌دهند (Naseri 1991). لیتولوژی، بارش، تکتونیک، وضعیت پوشش گیاهی، ژئومورفولوژی، وضعیت چینه‌شناسی و محیط رسوبی از عوامل مؤثر بر توسعه کارست در هر منطقه کربناته هستند (White 1988 & Karami 2009; Dreybrodt 1990). انحلال در سنگ‌آهک خالص نسبت به آهک دولومیتی و دولومیت سریع‌تر صورت می‌گیرد. افزایش مقدار ناخالصی‌های رسی و سیلتی در سنگ‌آهک به بیش از ۲۰ تا ۳۰٪ از توسعه کارست جلوگیری می‌کند. اندازه و بافت سنگ نیز در فرایند انحلال نقش مهمی دارد؛ به‌طوری‌که هرچه قدر اندازه دانه‌های تشکیل‌شده سنگ ریزتر باشد، با ورود آب به فضاهای خالی، سطح واکنش بیشتری با آب ایجاد می‌شود و انحلال بیشتر صورت می‌گیرد. یک سنگ کربناته با زمینه میکرایت (ریزدانه) نسبت به یک سنگ کربناته با زمینه اسپرایتی (درشت دانه) انحلال بیشتری دارد. انحلال در سنگ‌های آهکی ناهمگن با آلوم‌های مختلف نسبت به سنگ‌های همگن بیشتر صورت می‌گیرد؛ بنابراین، بایومیکرایت نسبت به میکرایت انحلال بیشتری دارد (Ford and Williams 2007).

توسعه شدید کارست بیشتر در آهک‌های ضخیم‌لایه و توده‌ای دیده می‌شود. علاوه بر لیتولوژی و ضخامت لایه‌ها، نسبت قرارگیری لایه‌ها نسبت به همدیگر در توسعه کارست نقش مهمی دارد که نشان‌دهنده وضعیت چینه‌شناسی منطقه است. قرارگیری لایه‌های شیلی یا مارنی با نفوذپذیری کم در توالی با لایه‌های آهکی ضخیم‌لایه و توده‌ای، مستعد

کارستی شدن نیستند و توسعه کارست درخور توجهی در

آهک‌ها صورت نمی‌گیرد (Domenico and Schwartz 1990; Karimi Goldscheider & Andreo 2007; Chitsazan et al. 2015; Karami 2009 & vardenjani 2010).

توالی چینه‌شناسی در دبی خروجی از چشمه‌ها نقش مهمی دارد؛ به‌طور مثال قرارگرفتن سازند دلیچای (با قابلیت کم برای فرایند کارستی شدن) در حد فاصل بین آهک‌های ضخیم‌لایه سازند لار (با قابلیت زیاد برای فرایند کارستی شدن) و محل ظهور چشمه علی دامغان سبب شده است، دبی چشمه علی دامغان در طی سال تغییرات زیادی نداشته باشد و آب آبخوان کارستی لار به‌صورت تدریجی از چشمه خارج شود (Karami 2009).

سازندهای زمین‌شناسی، درجه هوازدگی شیمیایی، کیفیت آب تغذیه‌شده، تبادلات شیمیایی و فعالیت انسانی بر کیفیت آب زیرزمینی هر منطقه تأثیرگذار است (Kalantari et al. 2001; Guler et al. 2004; Ayenew et al. 2008; Giridharan et al. 2008; Aly 2015)؛ بنابراین، بررسی تأثیرات سازندهای زمین‌شناسی و چینه‌شناسی بر کیفیت و کمیت آب زیرزمینی هر منطقه ضروری است.

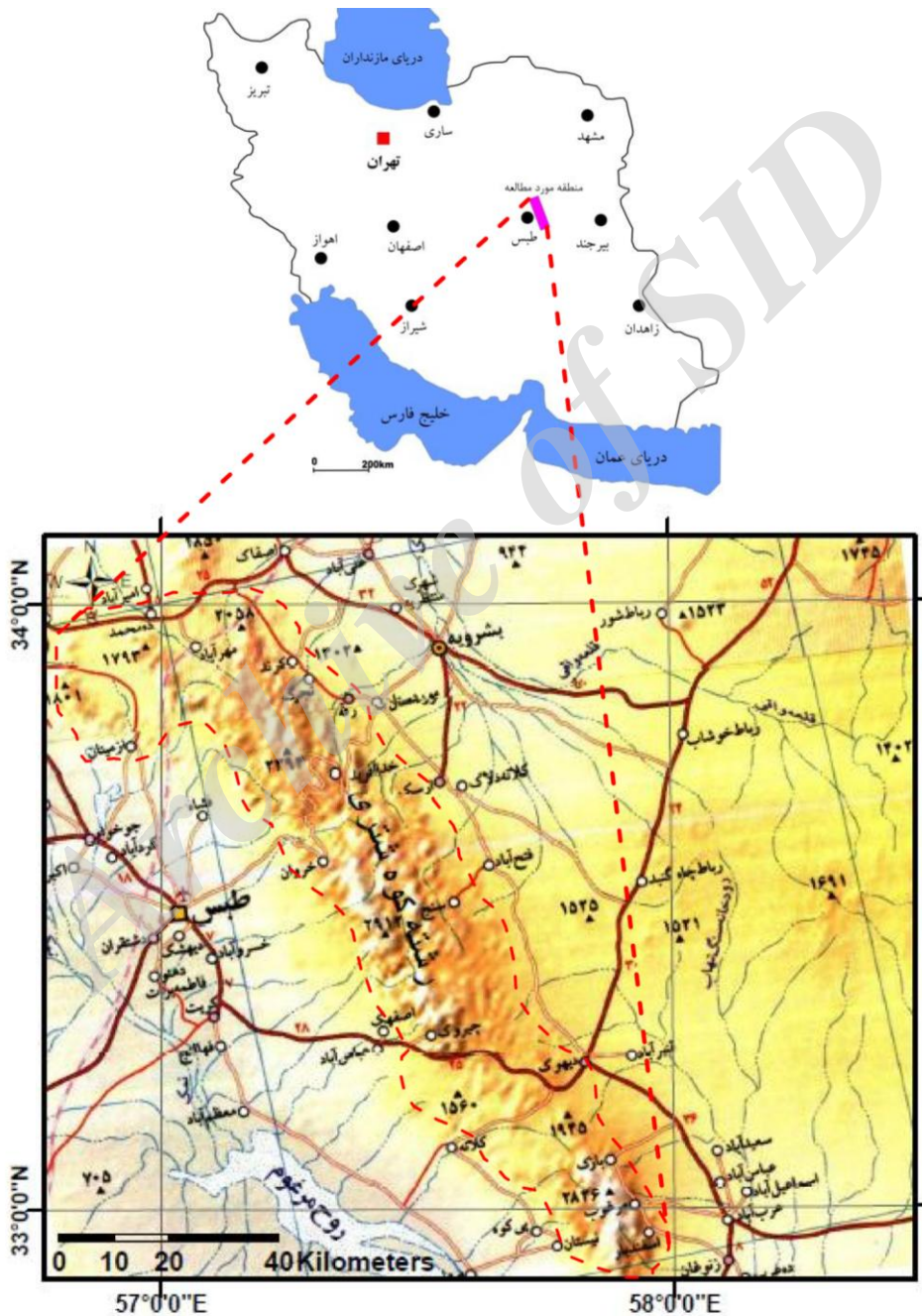
رشته‌کوه شتری در تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعت منطقه و تغذیه دو آبخوان طبس و بشرویه نقش مهمی دارد. عوامل متعددی در تشکیل آبخوان کارستی کوه شتری و ظهور و کیفیت آب چشمه‌های این رشته‌کوه سهیم است؛ اما نقش چینه‌شناسی به‌صورت آشکار مشاهده می‌شود. بنابراین در این پژوهش سعی شده است توسعه آبخوان کارستی کوه شتری، وضعیت ظهور چشمه‌های کارستی و کیفیت آب چشمه‌ها باتأکید بر نقش زمین‌شناسی و چینه‌شناسی مورد بررسی قرار گیرد.

موقعیت جغرافیایی

رشته‌کوه شتری بین طول‌های جغرافیایی ۵۶ درجه و ۴۵ دقیقه خاوری تا ۵۷ درجه و ۳۵ دقیقه خاوری و بین عرض‌های

۲۸۳۸ متر در جنوب خاوری طبس و حداقل ارتفاع ۶۳۶ متر در جنوب طبس واقع شده است. اقلیم منطقه، خشک و کویری و متوسط بارش در دشت، ۸۰ میلی‌متر است و در ارتفاعات به ۲۰۰ میلی‌متر می‌رسد.

جغرافیایی ۳۳ درجه شمالی تا ۳۴ درجه شمالی در ۲۰ کیلومتری خاور طبس در ایران مرکزی واقع شده است (شکل ۱). این رشته‌کوه، با طولی حدود ۱۲۰ کیلومتر و عرضی متوسط ۲۵ کیلومتر دارای روندی شمال باختری - جنوب خاوری است. بیشترین ارتفاع منطقه کوه شتری با ارتفاع



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

زمین‌شناسی منطقه مطالعه‌شده

رشته‌کوه شتری به لحاظ تقسیمات زمین‌شناسی، بخشی از خرد قاره ایران مرکزی است (Nabavi 1976). این رشته‌کوه در بخش خاوری بلوک طبس و در پایانه شمالی گسل ناپبند قرار دارد (شکل ۲). در این منطقه، نهشته‌های پالئوزئیک تا زمان حاضر با ترکیب غالب سنگ‌آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ، شیل، مارن، کنگلومرا، رسوبات آبرفتی به همراه سنگ‌های آتش‌فشانی برجای گذاشته شده است (Aghanabati 2010). سازندهای کربناته بیش از ۵۳٪ رشته‌کوه شتری را تشکیل می‌دهند و با داشتن ضخامت قابل توجه، مستعد تشکیل آبخوان‌های کارستی هستند (جدول ۱). این سازندها شامل سازندهای جمال، شتری و اسفندیار هستند، که به‌طور مختصر معرفی می‌شوند:

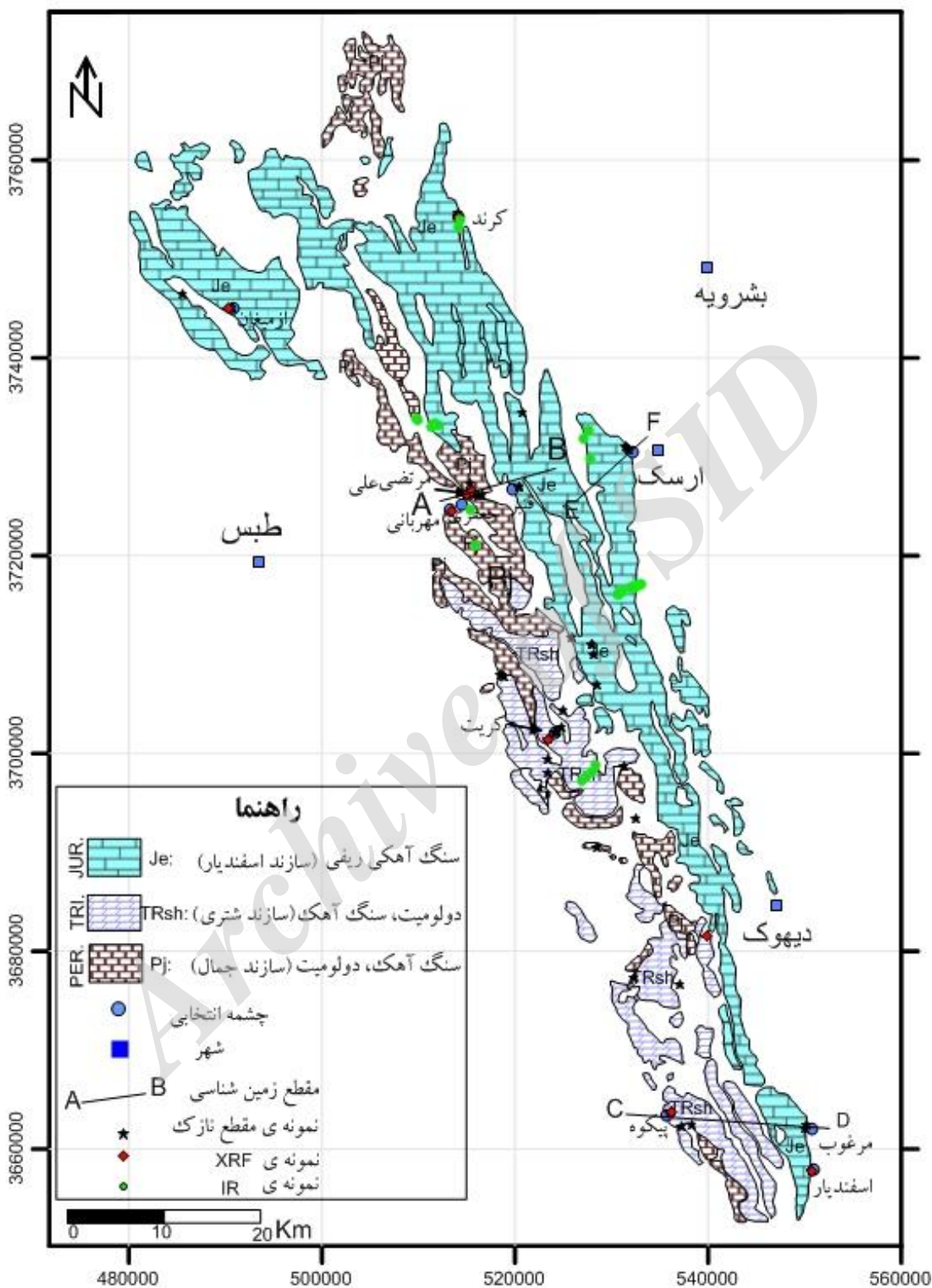
سازند جمال: بُرش الگوی سازند جمال در پهلوی جنوبی کوه جمال در جنوب طبس مطالعه و معرفی شده است (Stocklin et al. 1965). در این محل، مرز زیرین سازند جمال به سازند سردر است و با ناپیوستگی هم‌شیب با واحد سنگ چینه‌ای سازند سُرخ شیل، به سن تریاس پیشین، پوشیده می‌شود.

در بُرش الگو، سازند آهکی جمال شامل ۴۷۳ متر سنگ‌های کربناتی است که حدود ۶۰ متر بالای آن، دولومیت کرم رنگ و بقیه آن، سنگ‌آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای ریفی به رنگ خاکستری است. یافته‌های زمین‌شناسی جدید نشان می‌دهد سازند جمال، برخلاف شرح بیان‌شده برای بُرش الگو، منحصر به ردیف‌های کربناتی نیست. به‌عبارت‌دیگر، ۷۴ متر آواری‌های زیر سنگ‌آهک‌های سازند جمال در واقع ردیف‌های آواری پیش‌رونده این سازند هستند؛ بنابراین به پیشنهاد کمیته ملی چینه‌شناسی، آواری‌های ذکرشده از سازند سردر، حذف و نخستین عضو سازند جمال دانسته می‌شوند. بدین‌ترتیب، در بُرش‌های کامل، سازند جمال یک عضو ماسه‌سنگ کوارتزی در زیر، یک عضو سنگ‌آهک مرجانی در وسط و یک عضو دولومیتی در بالا دارد (Aghanabati 2010).

طاهری (2002) به ردیف‌های آواری حد فاصل سازند سردر (در زیر) و کربنات‌های سازند جمال، «عضو زُکدو» نام داده است و باتوجه‌به پراکندگی فوزولیناسه‌آ و شناسایی دو زون زیستی به تغییرات سنی کربنیفر بالایی - پرمین زیرین اعتقاد دارد. ایشان در برش حوض دوره (کوه جمال)، ردیف‌های «کربناتی» پرمین را چهار زون زیستی می‌داند.

سازند شتری: سازند شتری با سن تریاس میانی از ۸۲۰ متر دولومیت لایه لایه خاکستری رنگ ریزدانه متراکم فرسایش‌پذیری کم و ۱۵۲ متر سنگ‌آهک ضخیم‌لایه، سفید رنگ و متراکم (عضو اسپهک) تشکیل شده است. سازند زیرین شتری در همه‌جا سازند سُرخ شیل است که با یکدیگر گذر تدریجی و پیوسته دارند. در رشته‌کوه شتری، سازند شتری سیمای توده‌ای دارد. سن این سازند تریاس میانی (کارنین) است (Aghanabati A. 2010).

سازند اسفندیار: در برش الگو (باختر روستای اسفندیار) ضخامت این سازند حدود ۶۹۰ متر و در برخی جاها به بیش از ۱۰۰۰ متر می‌رسد و شامل سنگ‌آهک‌های توده‌ای روشن رنگ ریفی است (Stocklin et al. 1965). یک چهارم بخش پائینی این سازند از ماسه‌سنگ، آهک زیست آواری ماسه‌ای و نیز لایه‌های کنگلومرای تشکیل شده است. سیمای کوه‌ساز این سازند مدیون رخساره‌های ریفی - توده‌ای و نیز تراکم زیاد سنگ‌آهک است. در محل برش الگو، سازند اسفندیار روی بغمشاه قرار می‌گیرد. این مرز، همساز است؛ اما از نظر سنگ‌شناسی بسیار ناگهانی است. تغییر ناگهانی مارن‌های دریایی سازند بغمشاه به رخساره ماسه‌ای پایه اسفندیار، نشان‌دهنده کاهش ژرفای حوضه رسوبی است. در خاور رشته‌کوه طبس، مرز بالایی سازند اسفندیار سطحی فرسایشی است که به‌طور همساز با سنگ‌های پالئوسن - کرتاسه پوشیده شده است. سن این سازند ژوراسیک بالایی است (Aghanabati 2010).



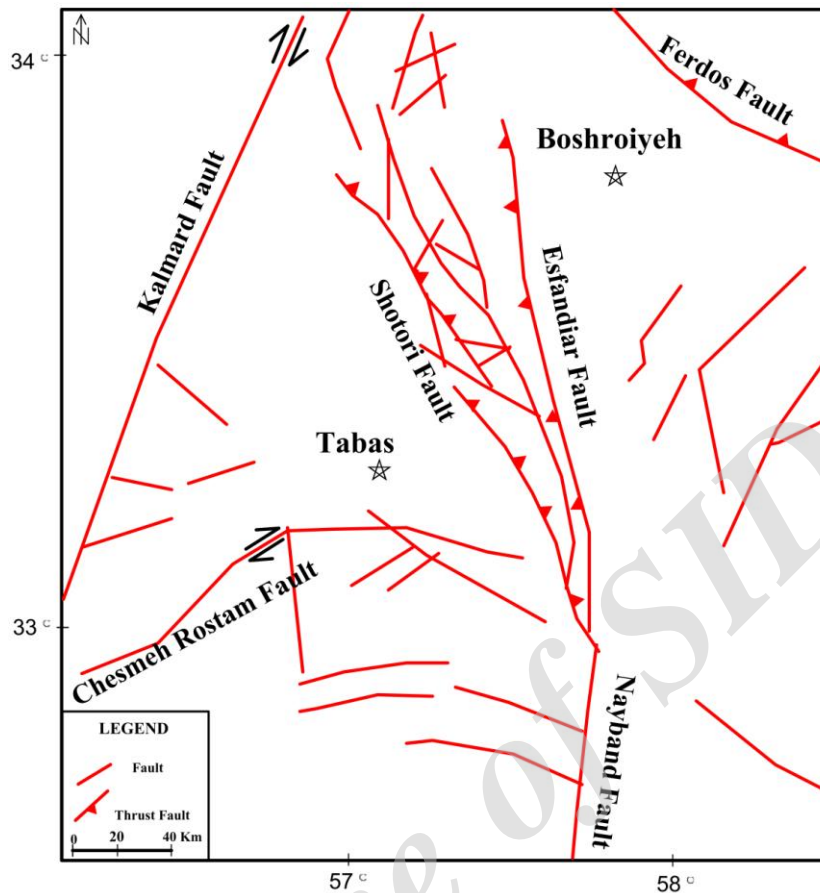
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه (اقتباس از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ بشرویه با تغییرات توسط نگارندگان)

جدول ۱- توالی چینه‌شناسی و هیدرواستراتوگرافی در رشته‌کوه شتری

سیستم	سری	علامت	سازند	سنگ شناسی	ضخامت (متر)	هیدرواستراتوگرافی
ژوراسیک	بالایی		اسفندیار	سنگ آهک ریفی	+۱۰۰۰	آبخوان
	میانی		قلعه دختر	سنگ آهک، شیل ماسه سنگ	۱۰۰۰	لایه ناتراوا
	زیرین		آب حاجی	ماسه سنگ، شیل	۰-۱۲۰۰	
تریاس	بالایی		نابیند	شیل، ماسه سنگ سنگ آهک	۰-۸۰۰	آبخوان
	میانی		شتری	دولومیت سنگ آهک	۱۰۰۰	
	زیرین		سرخ شیل	شیل کربناته رسی	۱۲۰	لایه ناتراوا
پریمین	زیرین		جمال	سنگ آهک دولومیت	۵۰۰-۸۰۰	آبخوان
کربنیفر	بالایی		سردر	سنگ آهک ماسه سنگ، شیل	۷۰۰	لایه ناتراوا

سازندهای نفوذناپذیر در برابر سازندهای کربناته را سبب شده است که این امر در تغذیه آبخوان‌های کارستی و محل ظهور چشمه‌ها نقش مهمی دارد؛ به طوری که بیشتر چشمه‌های منطقه در راستای این گسل‌ها دیده می‌شوند.

از نظر تکتونیکی در دو طرف رشته‌کوه شتری، گسل‌های اسفندیار و شتری وجود دارند که طی فرایند مشابه از عملکرد گسل امتداد لغز نابیند شکل گرفته‌اند (شکل ۳). این گسل‌ها در شکل کنونی رشته‌کوه شتری نقش بارزی دارند (Berberian 1972). عملکرد گسل‌ها خردشدگی و قراردادن



شکل ۳- نقشهٔ تکتونیکی منطقهٔ مطالعه‌شده و موقعیت گسل‌های منطقه (برپایان ۱۹۷۶) با ترسیم مجدد

و دبی در محل اندازه‌گیری و عناصر اصلی کاتیون‌ها (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم)، آنیون‌ها (بیکربنات، کلر و سولفات) در آزمایشگاه هیدروشیمی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی آنالیز شدند. با استفاده از آنالیز کیفی، تأثیر لیتولوژی و چینه‌شناسی بر کیفیت آب چشمه‌ها بررسی شد.

بحث و تحلیل یافته‌های پژوهش

در مطالعات پتروگرافی، سنگ‌آهک جمال را بیشتر ایتراکلاست بایوکلاست گرینستون تشکیل می‌دهد. این سنگ‌ها تخلخل قالبی و شکستگی دارند که با سیمان اسپارایتی پر شده‌اند (شکل‌های ۴-الف و ب). سازند شتری از دولومیت با تبلور مجدد برشی و خردشده (شکل ۴-ج) و سازند اسفندیار از مدستون - وکستون، بایوکلاست گرینستون و ایتراکلاست پلوئید گرینستون تشکیل

روش پژوهش

برای بررسی وضعیت لیتولوژی سازندهای جمال، شتری و اسفندیار، ۴۹ مقطع نازک میکروسکوپی، تهیه و پتروگرافی، ویژگی‌های بافتی و دیاژنیکی مطالعه شد. درصد خلوص کربنات و اکسیدهای اصلی با آنالیز ۹ نمونه XRF صورت گرفت.

با بازدید صحرائی در سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۴، تعداد ۱۱۸ دهنه چشمه آماربرداری و ۱۱ چشمه مهم آنها معرف انتخاب شد. با تهیه مقاطع و نقشه زمین‌شناسی از حوضه آبریز این چشمه‌ها تأثیر رخمون و سازندهای زمین‌شناسی بر محل ظهور چشمه‌ها بررسی شد. برای بررسی وضعیت کیفی آب چشمه‌ها، ۶۶ نمونه از چشمه‌های معرف در سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۴ برداشت شد. پارامترهای هدایت الکتریکی، اسیدیته، دما

جدول ۲- درصد مواد غیرقابل حل در اسید (IR%) در رشته‌کوه شتری

ردیف	سازند	درصد مواد غیرقابل حل در اسید (IR%)	درصد کربنات
۱	جمال	۲/۸-۶/۱	۹۳/۹-۹۸/۲
۲	شتری	۲-۷/۶	۹۴/۴-۹۸
۳	اسفندیار	۰/۷-۱۴/۹	۸۵/۱-۹۹/۳

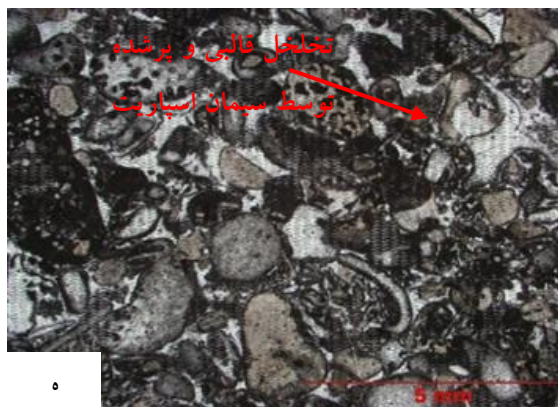
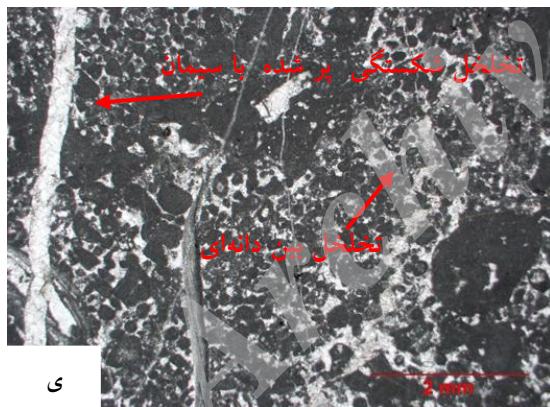
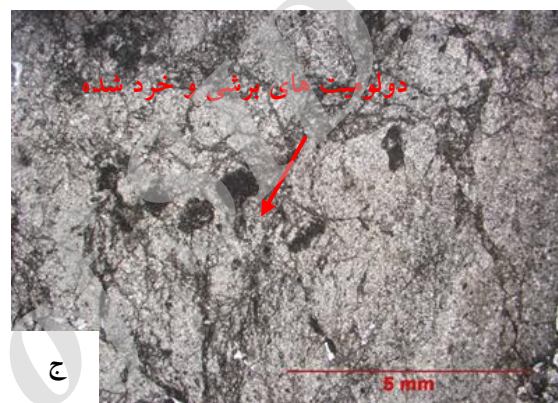
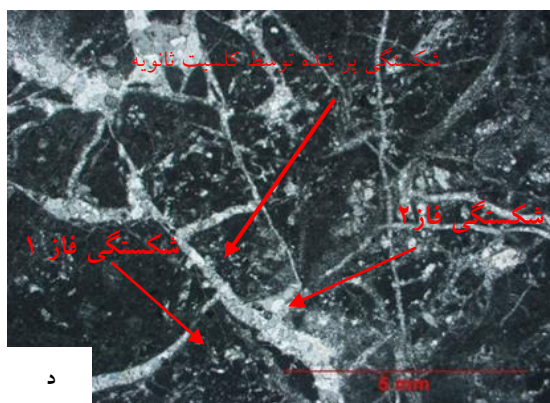
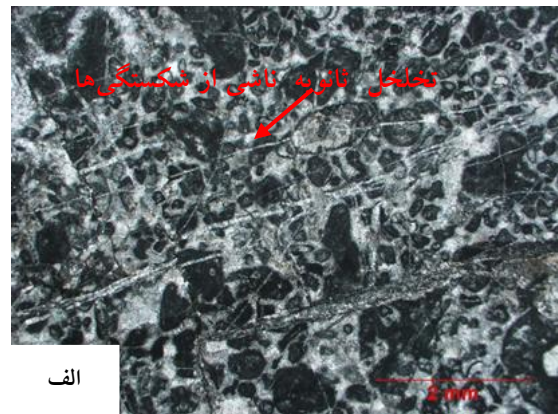
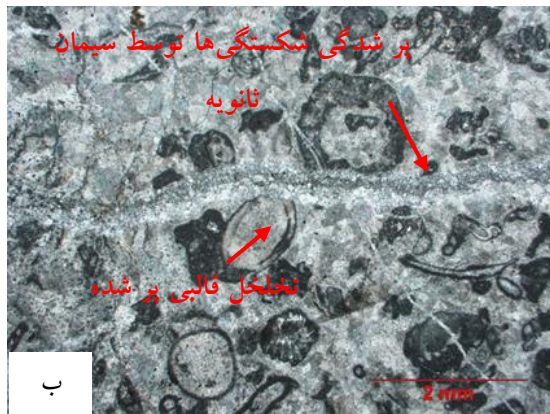
جنس یا ترکیب سنگ‌شناسی سازندهای کربناته در شکل‌گیری پدیده‌های کارستی و افزایش نفوذپذیری آن نقش اساسی دارد. براساس بررسی‌های انجام‌شده، با افزایش درجه خلوص سنگ کربناته، میزان انحلال‌پذیری آن افزایش می‌یابد. براساس آنالیز XRF روی ۹ نمونه برای تعیین دولومیتی بودن و مقدار کلسیت کانی‌های کربناته، سنگ‌آهک سازند اسفندیار خلوص بالا دارد و CaO آنها بیش از ۵۳٪ و MgO آنها کمتر از ۲٪ است. مقدار MgO در سازند جمال به ۱۵٪ و در سازند شتری به بیش از ۱۶٪ می‌رسد که نشان‌دهنده آهک دولومیتی و دولومیت است؛ بنابراین، سازند اسفندیار نسبت به سازند جمال و شتری شرایط مناسب‌تری برای توسعه کارست دارد (جدول ۳).

شده است (شکل ۴-د). تخلخل اولیه در سازند اسفندیار، بیشتر بین‌دانه‌ای (شکل ۴-ی) و تخلخل ثانویه از نوع قالبی و شکستگی بوده که با سیمان کربناته پر شده است (شکل ۴-ه). سنگ‌آهک سازند اسفندیار، بافت دانه ریزتر و ناهمگن‌تر دارد و در مقایسه با سازند جمال برای توسعه کارست مستعدتر است. در مقاطع هر سه سازند، دست‌کم دو فاز خردشدگی و پرشدگی با سیمان کربناته در مقاطع نازک این سازندها دیده می‌شود که نشان‌دهنده نقش مؤثر تکنونیک در توسعه کارست این منطقه است (شکل ۴-د).

برای تعیین مقدار ناخالصی نمونه، پس از پودرشدن، در اسیدکلریدریک (HCl) رقیق ۱ نرمال، حل و پس از ۳۰ دقیقه محلول از صافی عبور داده می‌شود و سپس کاغذ صافی پس از خشک کردن وزن می‌شود تا درصد مواد نامحلول در اسید تعیین شود (El Hefnawi et al. 2010). برای تعیین درصد مواد غیرقابل حل در اسید، ۲۷ نمونه از این سه سازند در اسید حل شده است (Asraf 2011). مقدار خلوص کربنات در بخش‌های زیرین سازند اسفندیار به دلیل ماسه‌سنگی بودن کمتر می‌شود؛ اما به‌طور کلی مقدار خلوص کربنات در هر سه سازند بیش از ۸۵٪ است و مستعد توسعه کارست هستند (جدول ۲).

جدول ۳- اجزای اصلی به‌دست‌آمده از آنالیز XRF سازندهای جمال، شتری و اسفندیار برحسب درصد

L.O.I	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	سازند
۴۲/۰۸	۰/۹۴	۵۳/۲۴	۱/۳۸	۰/۲۳	۱/۹۳	اسفندیار
۴۳/۲۰	۱/۰۶	۵۴/۷۱	۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۶۵	اسفندیار
۴۳/۲۰	۱/۲۴	۵۴/۰۰	۰/۴۱	۰/۱۳	۰/۹۲	اسفندیار
۴۴/۰۲	۱۴/۱۰	۳۲/۵۶	۱/۷۵	۱/۴۲	۴/۵۳	جمال
۴۳/۱۲	۲/۵۰	۵۰/۸۸	۱/۰۳	۰/۲۶	۱/۵۲	جمال
۴۲/۷۸	۱/۷۷	۵۴/۶۴	۰/۲۶	۰/۱۱	۰/۳۸	جمال
۴۵/۲۸	۱۶/۲۸	۳۵/۷۰	۰/۴۶	۰/۲۲	۰/۹۵	شتری
۴۶/۴۶	۲۰/۹۴	۳۲/۰۹	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۱۶	شتری
۴۶/۲۱	۲۵/۵۷	۳۲/۷۳	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۱۶	شتری



شکل ۴- ریزرخساره‌های داده‌شده در سازند جمال و اسفندیار. الف) سنگ‌آهک جمال (ایتراکلاست بیوکلاست گرینستون، دو فاز شکستگی و خردشدگی و پرشدگی با سیمان کلسیتی)، ب) سنگ‌آهک جمال (بیوکلاست گرینستون، پرشدگی تخلخل ثانویه حفره‌ای و شکستگی‌ها)، ج) دولومیت برشی سازند شتری، د) سنگ‌آهک اسفندیار (مدستون، پکستون با پرشدگی رگه‌های ثانویه با سیمان اسپارایتی، و) سنگ‌آهک اسفندیار (بیوکلاست گرینستون)، ی) سنگ‌آهک اسفندیار (ایتراکلاست پلوئید گرینستون)

که گنجایش پذیرش حجم درخور توجهی از آب را داشته باشد. با افزایش ضخامت سازند امکان تشکیل مخازن آب زیرزمینی در آن افزایش می‌یابد. ضخامت سازند اسفندیار به

نقش چینه‌شناسی در ظهور چشمه‌ها و توسعه کارست، بیشتر شامل ضخامت سازند و لایه‌های تشکیل‌دهنده آن و توالی چینه‌شناسی هستند. ضخامت سازند باید به حدی باشد

مجموع دبی تخلیه‌شده براساس اندازه‌گیری‌های شهریور ماه ۱۳۹۵ حدود ۵۲۸ لیتر در ثانیه است. چشمه‌های خارج‌شده از سازندهای کربناته، حدود ۸۳٪ آب این رشته‌کوه را تخلیه می‌کند. با وجود اینکه سازند اسفندیار، ۳۰/۴٪ مساحت این منطقه را تشکیل می‌دهد، حدود ۶۰٪ تخلیه از این رشته‌کوه از این سازند صورت می‌گیرد که نشان‌دهنده توسعه بیشتر کارست در این سازند نسبت به سازندهای جمال و شتری است (جدول ۴). مقایسه بین مقدار تخلیه از چشمه‌های منطقه و مقدار تغذیه (متوسط بارش ۱۶۵ میلی‌متر بر مبنای همبستگی ارتفاع بارش و درصد نفوذ حداقل ۲۰٪) نشان می‌دهد مقدار تغذیه در این رشته‌کوه معادل تخلیه ۱۳۷۰ لیتر در ثانیه در طی سال است. چشمه‌های کارستی حدود ۴۴۰ لیتر در ثانیه را تخلیه می‌کنند؛ از این رو معادل حدود ۹۳۰ لیتر در ثانیه در سال سبب تغذیه آبخوان‌های طبس و بشرویه می‌شوند. پهنه‌های وسیع بدون چشمه در این رشته‌کوه نشان‌دهنده تخلیه آب به آبرفت‌های مجاور است.

بیش از ۱۰۰۰ متر می‌رسد (Stocklin et al. 1965). قابلیت ذخیره آب در این سازند نسبت به سازند شتری و جمال بیشتر است.

ضخامت لایه‌ها در توسعه کارست نقش مهمی دارد؛ به‌طور کلی سازندهای ضخیم‌لایه در شرایط مساوی قابلیت انحلال بیشتری نسبت به سازندهای با لایه‌بندی نازک دارند. ضخامت لایه‌ها در سازند اسفندیار نسبت به سازند شتری و جمال بیشتر است (شکل ۴)؛ بنابراین، قابلیت انحلال و کارستی‌شدن سازند اسفندیار بیشتر است. شناخت توالی چینه‌شناسی در ظهور چشمه‌ها در سازندهای کربناته اهمیت زیادی دارد. برای اینکه یک آبخوان کارستی تشکیل شود باید سازندهای زیرین و بالایی سازند از دیدگاه هیدروژئولوژیکی ناتراوا باشد. سازند سردر در زیر سازند جمال، سرخ شیل در زیر سازند شتری و سازند بغمشاه در زیر سازند اسفندیار، تشکیل آبخوان‌های کارستی در رشته‌کوه شتری را سبب شده‌اند.

جدول ۴- فراوانی و مقدار تخلیه چشمه‌های رشته‌کوه شتری در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴

ردیف	نام سازند	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت کل منطقه	تعداد چشمه	مقدار تخلیه (لیتر بر ثانیه)	درصد تخلیه
۱	جمال	۲۶۵	۱۰/۶	۱۶	۶۳	۱۲
۲	شتری	۲۹۰	۱۱/۶	۱۱	۵۸	۱۱
۳	اسفندیار	۷۶۰	۳۰/۴	۳۳	۳۱۹	۶۰
۴	سایر سازندها	۱۱۸۵	۴۷/۴	۵۸	۸۱	۱۷

سطح اساس چشمه‌های تخلیه‌شده از سازند شتری، سازند سردر با لیتولوژی شیل و ماسه‌سنگ است (شکل ۵). هدایت الکتریکی آب چشمه‌های این سازند از ۷۲۰ تا ۱۱۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است. چشمه آب گرم مرتضی‌علی با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و دمای ۳۳/۷ درجه سانتیگراد از مهم‌ترین چشمه‌های این سازند است. افزایش هدایت الکتریکی و دمای آن به دلیل چرخش عمقی آب از طریق درزه‌ها و گسل‌ها است (جدول ۵).

سطح اساس چشمه‌های تخلیه‌شده از سازند جمال، سازند سردر با لیتولوژی شیل و ماسه‌سنگ است (شکل ۵). هدایت الکتریکی آب چشمه‌های این سازند از ۷۲۰ تا ۱۱۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر است. چشمه آب گرم مرتضی‌علی با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و دمای ۳۳/۷ درجه سانتیگراد از مهم‌ترین چشمه‌های این سازند است. افزایش هدایت الکتریکی و دمای آن به دلیل چرخش عمقی آب از طریق درزه‌ها و گسل‌ها است (جدول ۵).

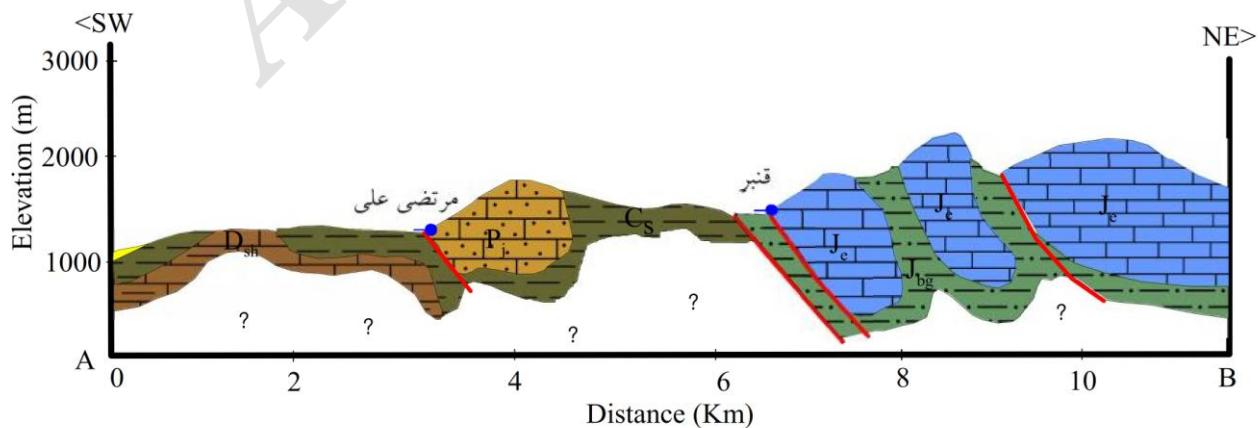
مقایسه با چشمه‌های دیگر خارج‌شده از سازند اسفندیار را موجب شده است.

نسبت Ca/Mg در سفره‌های کارستی، شاخصی برای تشخیص لیتولوژی سفره است. افزایش غلظت منیزیم و کاهش نسبت Ca/Mg نشان‌دهنده زمان ماندگاری بیشتر آب در آبخوان و سنگ دولومیت در منطقه تغذیه است. نسبت بین ۱ و ۲، ترکیب دولومیتی سفره، نسبت بین ۲/۵ تا ۴، سنگ دولومیت آهکی، نسبت بین ۵ تا ۷، سنگ‌آهک دولومیتی و نسبت بیش از ۸، سنگ میزبان سنگ‌آهک را نشان می‌دهد (Chery and Marsily 2007). متوسط نسبت Ca/Mg در چشمه‌های سازند جمال ۱/۱۶، سازند شتری ۱/۱۲ و سازند اسفندیار ۱/۲۵ است (جدول ۵). نسبت Ca/Mg نشان‌دهنده ترکیب سنگ میزبان با ترکیب غالب دولومیتی و زمان ماندگاری طولانی آب در رشته‌کوه است.

بررسی تغییرات دبی در سه چشمه (ارسک معرف سازند اسفندیار، کریت معرف سازند شتری و جعفری معرف سازند جمال) در طی سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ نشان‌دهنده بیشترین تغییرات دبی در چشمه‌های سازند اسفندیار (۲۲٪)، سازند شتری (۱۵٪) و سازند جمال (۱۷٪) است که جریان غالب افشان در تمام منطقه و به‌طور نسبی توسعه‌یافتگی بیشتر کارست در سازند اسفندیار را نشان می‌دهد (شکل ۸).

با چشمه کریت به دلیل تماس آب با سازند آب‌حاجی با ترکیب ماسه‌سنگ، شیل و ژئیس در این منطقه است.

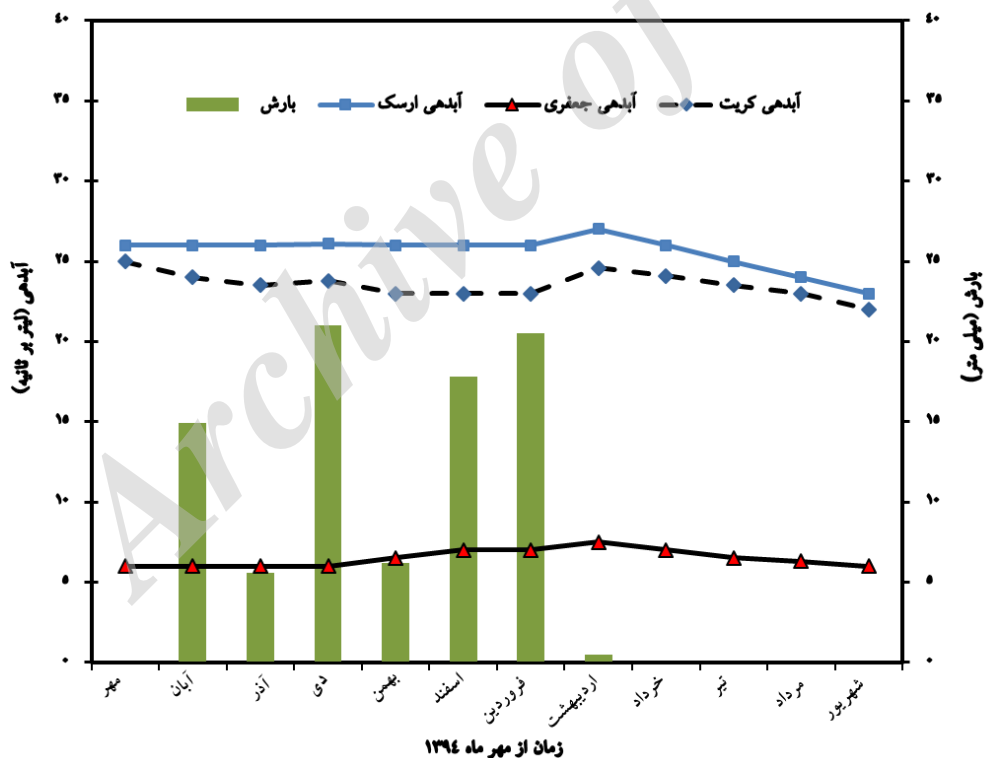
سطح اساس چشمه‌های تخلیه‌شده از سازند اسفندیار به چهار گروه تقسیم می‌شود. گروه اول چشمه‌هایی است که از مرز سازند اسفندیار و ولکانیک‌های پالئوژن تخلیه می‌شوند. این چشمه‌ها هدایت الکتریکی آب ۴۱۰ تا ۵۲۰ میکروموس بر سانتی‌متر دارند. گروه دوم چشمه‌هایی است که سطح اساس آنها سازند قلعه‌دختر است (شکل ۷) و هدایت الکتریکی ۵۰۰ تا ۶۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر دارند. گروه سوم چشمه‌هایی است که از مرز سازند اسفندیار و سازند کرند با لیتولوژی مارن و سنگ‌آهک تخلیه می‌شوند. این چشمه‌ها هدایت الکتریکی ۴۵۰ تا ۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر دارند. گروه چهارم چشمه‌هایی است که سطح اساس آنها سازند بغمشاه است و در دامنه باختری رشته‌کوه قرار دارند و هدایت الکتریکی آنها ۶۷۰ تا ۱۸۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر (چشمه‌های قنبر و ازمیغان) است (شکل ۵). تغییر لیتولوژی سازند در سطح اساس چشمه‌ها، تغییر کیفیت آب چشمه‌ها را سبب شده است. در دامنه شمال باختری، مقدار ژئیس در سازند بغمشاه افزایش یافته است و در بخش‌هایی از حوضه آبرگیر چشمه ازمیغان سازند بغمشاه رخنمون دارد. این امر، کاهش کیفیت آب چشمه ازمیغان در



شکل ۵- مقطع زمین‌شناسی چشمه‌های مرتضی‌علی و قنبر

جدول ۵- مشخصات چشمه‌های مهم و معرف رشته‌کوه شتری

Ca/Mg	میانگین هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتی‌متر)	میانگین دبی (لیتر بر ثانیه)	نام سازند سطح اساس	نام چشمه	نام سازند
۱/۲۴	۱۱۴۵	۳۰	سردر	مرتضی علی	جمال
۱/۲۱	۷۸۳	۶	سردر	جعفری	
۱/۰۵	۷۲۶	۳	سردر	مهربانی	
۱/۰۸	۸۲۸	۲۴	سرخ شیل	کریت	شتری
۱/۱۷	۲۶۸۰	۱۰	آب حاجی	پیکوه	
۱/۰۷	۵۱۱	۱۲	ولکانیک	اسفندیار	اسفندیار
۱/۱۱	۴۱۹	۱۶	ولکانیک	مرغوب	
۱/۲۷	۵۴۰	۲۴	قلعه دختر	ارسک	
۱/۴۲	۴۷۷	۵	کرنند	کرنند	
۱/۲۳	۱۸۰۳	۶۳	بغمشاه	ازمیغان	
۱/۳۹	۶۷۹	۶۰	بغمشاه	قنبر	



شکل ۸- هیدروگراف چشمه‌های معرف سازندهای جمال، شتری و اسفندیار در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴

نتیجه

کوه‌های شتری را تشکیل داده است. توالی چینه‌شناسی در این

رشته‌کوه، ایجاد سه آبخوان کارستی جمال، شتری و اسفندیار

سازندهای کربناته جمال، شتری و اسفندیار بیش از ۵۳٪

- Industry and Mines, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. 606 p. (in Persian).
- Asraf T. 2011. Investigating the effect of karstic processes on water sources in carbonate rocks in the Shotori area, East Iran. MSc. Thesis, Birjand University, 175 p. (in Persian).
- Ayenev T. Demlie M. and Wohnlich S. 2008. Hydrogeological framework and occurrence of groundwater in the Ethiopian aquifers. *Journal of African Earth Sciences*, 52(3): 97-113.
- Berberian M. 1976. Contribution to the seismotectonic of Iran (part II). Geological Survey of Iran, Rep. No. 39.
- Chery L. and Marsily G. 2007. Aquifer Systems Management: Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage. Selected Papers on Hydrogeology 10. CRC Press, 588 p.
- Chitsazan M. Vardanjani H. K. Karimi, H. and Charchi A. 2015. A comparison between karst development in two main zones of Iran: case study—Keyno anticline (Zagros Range) and Shotori anticline (Central Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 8(12):10833-10844.
- Domenico P. A. and Schwartz F. W. 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley, New York, 824 p.
- Dreybrodt W. 1990. The role of dissolution kinetics in the development of karst aquifers in limestone: a model simulation of karst evolution. *The Journal of Geology*. 98(5):639-655.
- El Hefnawi M. A. Mashaly A. O. Shalaby B. N. and Rashwanetal M. A. 2010. Petrography and geochemistry of Eocene limestone from Khashm Al-Raqaba area, El-Galala El-Qibliya, Egypt: *Carbonates Evaporites*, 25: 193-202.
- Ford D.C. and Williams P.W. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester. John Wiley; Second edition, 553 p.
- Giridharan L. Venugopal T. and Jayaprakash M. 2008. Evaluation of the seasonal variation on the geochemical parameters and quality assessment of the groundwater in the proximity of River Cooum, Chennai, India. *Environmental monitoring and assessment*, 143: 161-178.
- Guler C. and Thyne G. D. 2004. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *Journal of Hydrology*, 285: 177-198.

را سبب شده است. حدود ۸۳٪ تخلیه آب چشمه‌های این رشته‌کوه از این سازندها صورت گیرد.

مطالعات سنگ‌نگاری آهک جمال را اینتراکلاست، بایوکلاست گریستون، سازند شتری را دولومیت و سازند اسفندیار را وکستون تا بایوکلاست گریستون نشان می‌دهد. در این سنگ‌ها تخلخل اولیه، بیشتر از نوع حفره‌ای و بین‌دانه‌ای و تخلخل ثانویه، شکستگی‌ها هستند که با سیمان کلسیتی پر شده‌اند. تخلخل ناشی از شکستگی‌ها در توسعه کارست در این منطقه نقش بیشتری دارد. مطالعات XRF نشان‌دهنده دولومیتی شدن بخش‌های بالایی سازند جمال و بخش زیرین سازند شتری است. خلوص سنگ‌آهک در سازند اسفندیار از سازند جمال و شتری بیشتر است و مقدار MgO آنها کمتر از ۲٪ است. مقدار مواد نامحلول در اسیدکلریدریک این سازندها کمتر از ۱۵٪ است. شرایط بافتی و خلوص این سازندها نشان‌دهنده مستعدبودن آنها برای پدیده کارست است. نسبت مولار Ca/Mg در چشمه‌های معرف بین ۱ تا ۲ است که نشان‌دهنده ترکیب سنگ میزبان با ترکیب غالب دولومیتی و زمان ماندگاری طولانی آب در رشته‌کوه است. گسترش بیشتر، ضخامت بیش از ۱۰۰۰ متر و ضخیم‌لایه‌بودن سازند اسفندیار، توسعه بیشتر کارست و فراوانی چشمه‌های با دبی بالا در آن را سبب شده است. کیفیت آب چشمه‌های خارج‌شده از سازند اسفندیار با سطح اساس ولکانیکی، هدایت الکتریکی ۴۱۰ تا ۵۲۰ میکروموس بر سانتی‌متر، سازند اسفندیار با سطح اساس قلعه‌دختر، هدایت الکتریکی ۵۰۰ تا ۶۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، سازند اسفندیار با سطح اساس سازند کوند، هدایت الکتریکی ۴۵۰ تا ۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و سازند اسفندیار با بغمشاه، هدایت الکتریکی ۶۷۰ تا ۱۸۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر دارند. چینه‌شناسی در کمیت و کیفیت آب چشمه‌های هر منطقه نقش مهمی دارد.

References

- Aghanabati A. 2010. Geology of Iran. Ministry of

- Kalantari N. and Farzad A. 2001. Groundwater occurrence in Fariab tectonic valley. *Journal of applied Hydrology*, 16: 18-23.
- Karami G. H. 2009. The role of stratigraphy of karst development of the Damgan's Chesme- Ali spring catchment area, *Journal of Stratigraphy and Sedimentology*. 36: 39-52. (in Persian).
- Karimi Vardenjani H. 2010. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Eram press 399 p.(in Persian).
- Nabavi M. H. 1976. An introduction of Geology in Iran. Publications of Geological Survey of Iran. 109 p. (in Persian).
- Naseri H.R. 1991. Hydrogeology of karst springs in the Drodzan dam catchment area. MSc. Thesis, Shiraz University. 325 p. (in Persian)
- Scheider N. Drew D. (Eds.). 2007. *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology*, 26. CRC Press. Taylor & Francies, London, 264 p.
- Stocklin J. Eftekhar-Nezhad J. and Hushmand Zadeh A. 1965. Geology of the Shotori Range (Tabas area, East Iran). Rep. No. 3.69 p.
- Stocklin J. Eftekhar-Nezhad J. and Hushmand Zadeh A. 1965. Geology map of Boshruyeh (Scale 1:25000). Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. Sheet No. J7.
- Taheri A. 2002. Stratigraphy of Permian sediments (Jamal Formation) in the Tabas basin. PhD thesis. Isfahan University. 157 p. (in Persian).
- White W.D. 1988. *Geomorphology and hydrology of karst Terrains*, Oxford University Press, Oxford, 464 p.

Archive of SID

Archive of SID