

## نقش ساختارهای تکتونیکی در هدایت آب‌های زیرزمینی به قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس-استان کرمانشاه

حمیدرضا ناصری<sup>۱</sup>، نرگس بیات<sup>۲</sup>، لیلی ایزدی کیان<sup>۳</sup> و فرشاد علیجانی<sup>۴</sup>

۱. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۲. کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۳. استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا
۴. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۳/۱۷

### چکیده

جریان‌های محلی آب زیرزمینی با دبی بالا در تونل‌های سنگی، باعث ایجاد مسائل تکنیکی و زیست‌محیطی در ساختارهای زیرسطحی می‌شوند. ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها، شکستگی‌های باز و کانال‌های انحلالی نقش مهمی در هدایت آب‌های زیرزمینی به داخل تونل دارند. با این حال، اغلب پیش‌بینی‌های جریان آب از این ساختارها با استفاده از روش‌های تحلیلی و تجربی، به دلیل فرضیات هیدرولوژیک و ساده‌کننده از قبیل محیط متخلخل همگن و همسو (ایزوتروپ) در اطراف تونل، ناکارآمد هستند. تونل انتقال آب زاگرس در شمال غرب استان کرمانشاه واقع شده است. در زمان حفاری قطعه دوم تونل زاگرس، سطوح شکستگی موجب هدایت حجم زیاد آب زیرزمینی به داخل تونل شدند. حفاری این قطعه از تونل زاگرس از سازند پابده شروع شد و پس از عبور از سازند گورپی، با ورود به سازند ایلام در تاق‌دیس ازگله، حجم زیاد آب‌های زیرزمینی، موجب ایجاد مشکلات و خسارات فراوانی در عملیات حفاری شد. در این مطالعه به منظور شناسایی عوامل مؤثر بر ورود جریان آب به تونل، ساختارهای زمین‌شناسی در پهنه‌های دارای دبی بالا مشخص و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بیشترین دبی ورودی به تونل ۸۰۰ لیتر بر ثانیه در پهنه 23Hz در تاق‌دیس آهکی کردی قاسمان بوده است. ارتباط ساختارهای زمین‌شناسی در مسیر تونل و جریان آب زیرزمینی ورودی نشان داد که گسل‌ها موجب هدایت آب زیرزمینی به داخل تونل شده‌اند. ارزیابی جریان‌های مقطعی آب زیرزمینی با دبی بالا در تونل‌های سنگی بر اساس خصوصیات ساختارهای زمین‌شناسی نسبت به روش‌های تحلیلی و تجربی مناسب‌تر می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** جریان آب زیرزمینی، ساختار زمین‌شناسی، تونل زاگرس، کرمانشاه.

### مقدمه

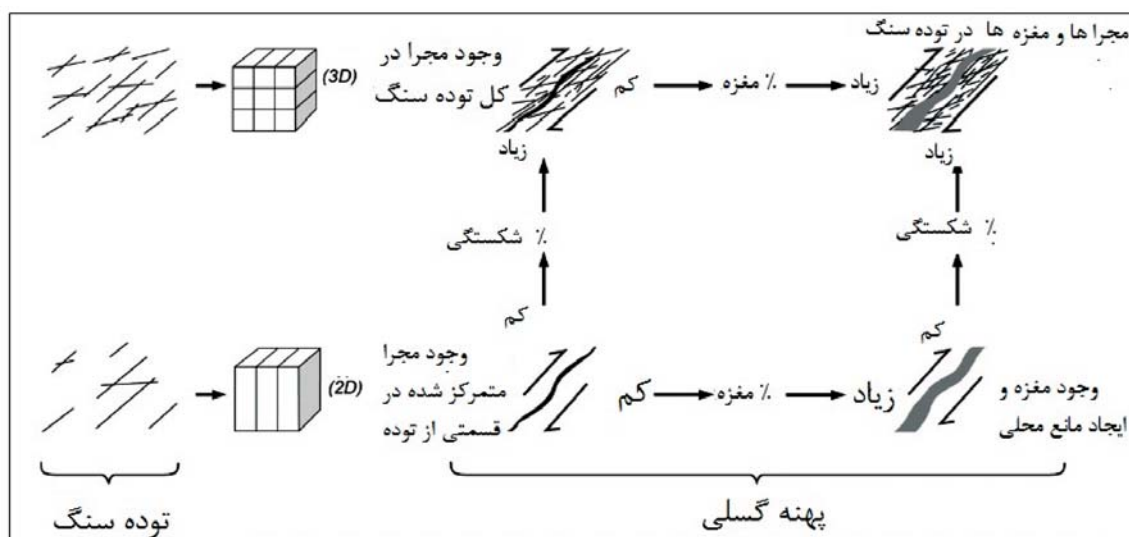
صورت می‌گیرد. جریان آب و هجوم آن به محیط تونل حین حفاری، آثار مخربی بر روند عملیات حفاری می‌گذارد و می‌تواند فعالیت تونل‌سازی را کاملاً تحت تأثیر قرار دهد (رفیعی و همکاران، ۱۳۹۲). تخمین مقدار و نرخ جریان آب

یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات پیش رو در عملیات تونل‌سازی در توده‌های سنگی، ورود آب زیرزمینی به درون تونل است که از طریق ناپیوستگی‌های اولیه در دیواره تونل

\* نویسنده مرتبط: nbayat87@yahoo.com

زیرزمینی به داخل تونل قبل از حفاری بسیار مشکل است، زیرا مقدار جریان آب زیرزمینی وارد شده به تونل با ساختارهای زمین‌شناسی و هدایت هیدرولیکی لایه‌های سنگی تغییر چشم‌گیری می‌کند (Lin and Lee, 2009). بسیاری از مشکلات ژئوتکنیکی در تونل‌هایی که در پهنه‌های گسلی و خرد شده حفر می‌شوند به وجود می‌آید (Goel, 2014). مشکلات ژئوتکنیکی حفر تونل در هنگام برخورد به پهنه‌های گسلی عبارت‌اند از: بی‌ثباتی سطح، تغییر شکل ناشی از تحکیم و یا تورم سنگ‌های گسلی شده و بی‌ثباتی در مراحل ساخت و ساز (Riedmuller, 1987). طبق طرح مفهومی (شکل ۱) پهنه‌های گسلی اغلب به‌عنوان ساختارهای

نفوذپذیر و مجراهایی برای هدایت آب به داخل تونل عمل می‌کنند (Fransson and Hernqvist, 2010). ژئول (Geol, 2014) با بررسی حفر تونل در سنگ‌های ضعیف و شکننده هیمالیا، بیشترین مشکلات را انتخاب یک روش مناسب تحقیقات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌ها، توسعه یک طبقه‌بندی مهندسی برای توده سنگ‌های آمیخته و انتخاب صحیح TBM دانست. اسنو (Snow, 1965) نشان داد که جریان از میان یک شکستگی ایده‌ال با صفحات موازی، متناسب با مکعب بازشدگی است که به‌عنوان قانون مکعب شناخته شد.



شکل ۱. طرح مفهومی از ساختار نفوذپذیر در توده سنگ (چپ) و پهنه گسلی (راست) (Hernqvist et al., 2012)

معمولاً رویدادهای خطرناک در طی حفر تونل، هنگام ورود ناگهانی آب زیرزمینی از طریق ساختارهای زمین‌شناسی همانند پهنه‌های گسلی و شکستگی‌های باز رخ می‌دهند. برخی از این ساختارهای زمین‌شناسی و بلایای مرتبط با آن، بارها در تونل‌های زاگرس (Shahriar et al., 2008)، البرز (Wenner and Wannemacher, 2009) و کوهرنگ گزارش شده است (Zarei et al., 2011). بنابراین لازم است محل و مقدار جریان ورودی آب به داخل تونل پیش‌بینی و در ملاحظات تونل‌سازی در نظر گرفته شود.

ساختارهای منشعب معمولاً در سراسر توده سنگ وجود دارند. این ساختارها سیستم‌های به هم پیوسته‌ای از ناپیوستگی‌ها هستند و از نظر نوع، شامل سطوح لایه‌بندی و درزه‌های ساختاری می‌باشند.

برخی از این شکستگی‌ها، مسیر انتقال آب به داخل تونل می‌باشند. برخی نیز اگرچه حاوی آب هستند اما به دلیل بسته شدن ناشی از فشار سنگ‌ها و یا متصل نبودن به دیگر شکستگی‌ها، نقشی در انتقال آب به داخل تونل ندارند (Berkowitz, 2002). طرح مفهومی از ساختارهای نفوذپذیر با سیستم شکستگی و سیستم جریان در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. شکستگی‌های دوبعدی و سیستم جریان یک‌بعدی (Butron, 2009)

چینه‌ای سازندهای آهک رسی پابده، شیل‌های گورپی، آهک ایلام، آهک رسی نازک لایه و شیل‌های گرو در حدفاصل تاقدیس کردی قاسمان تا خروجی ازگله عبور می‌کند. برای حفر تونل با توجه به بررسی‌های فنی و اقتصادی، دستگاه حفاری شیلد تلسکوپی (D.S.TBM) انتخاب شده است. محدوده مورد مطالعه در این تحقیق شامل ۱۷/۴ کیلومتر از طول تونل زاگرس در حدفاصل بین رودخانه کردی قاسمان تا خروجی تونل در روستای ازگله می‌باشد که بخشی از قطعه دوم تونل زاگرس است.

## روش کار

### بررسی زمین‌شناسی و ساختارهای منطقه

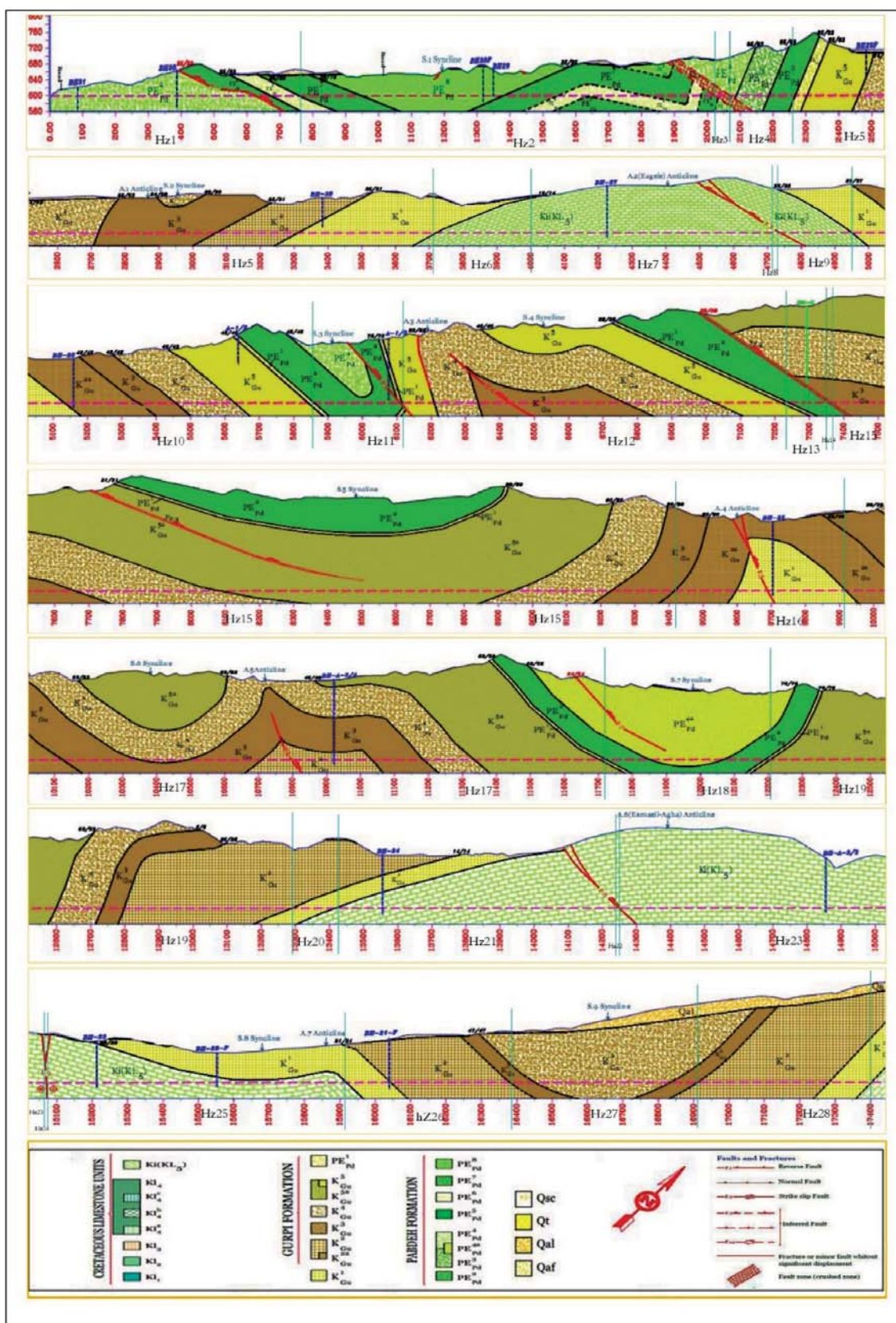
تونل زاگرس در پهنه زاگرس چین‌خورده ساده قرار گرفته است و از درون سنگ آهک‌های نازک لایه مارنی و شیل‌های سبزرنگ پابده، شیل‌های تیره رنگ و آهک‌های رسی گورپی و سنگ آهک‌های خاکستری ایلام عبور می‌کند. منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر حرکات تکتونیکی جوان زاگرس، چین‌خورده است. سطح محوری تاقدیس‌ها (شش تاقدیس) و ناودیس‌ها (هشت ناودیس) اغلب قائم و امتداد آن‌ها شمال غرب به جنوب شرق است (شکل ۵). دو تاقدیس ازگله و کردی قاسمان و ناودیس 5S جز ساختارهایی هستند که آب ورودی به تونل در آن‌ها زیاد بوده است. با توجه به موقعیت تکتونیکی منطقه، هشت گسل با سازوکار رانندگی و معکوس و دو پهنه گسله معکوس در منطقه شکل گرفته‌اند. ساختارهای موجود در منطقه را می‌توان به ساختارهای اصلی و بزرگ مقیاس (چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها و پهنه‌های گسله) و ساختارهای فرعی و کوچک مقیاس تقسیم کرد. ساختارهای فرعی شامل گسل‌های کوچک با جابجایی در حد

نفوذپذیری توده سنگ‌ها و شرایط زیست‌محیطی می‌باشد (Palmstrom and Stile, 2007). زارعی و همکاران (Zarei et al., 2011) با بررسی نشت آب ورودی به تونل سمنان نشان دادند که روابط تحلیلی و تجربی، در برآورد جریان از میان ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها و شکستگی‌های باز مناسب نمی‌باشند.

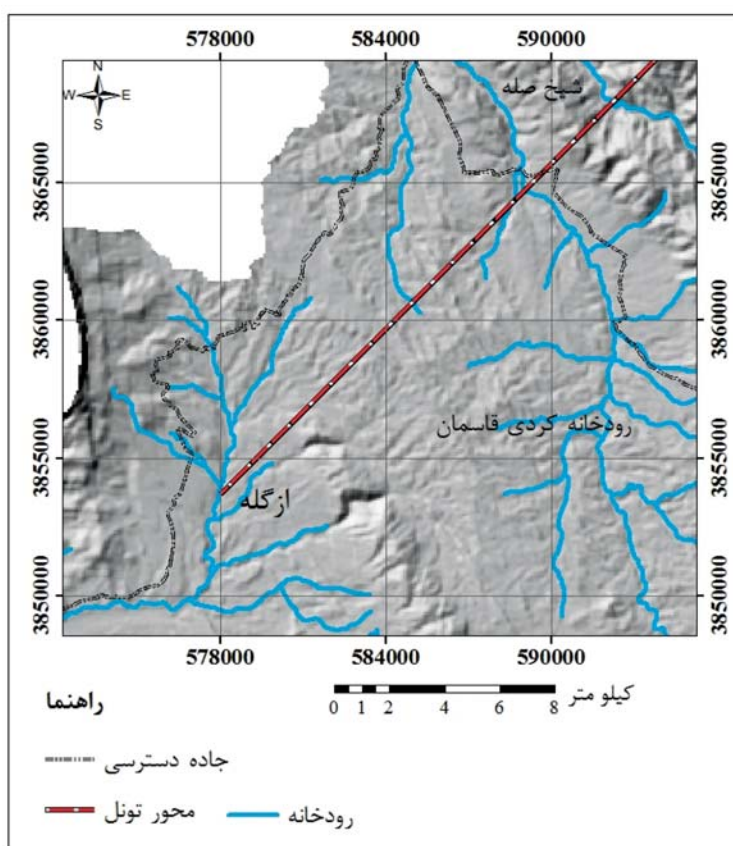
در این تحقیق به منظور نشان دادن تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر عملیات حفر تونل، جریان ورودی آب زیرزمینی به قطعه دوم تونل زاگرس در بخش‌های گسلی و شکنا مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا با بررسی اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های دبی ورودی به تونل، دو آبخوان تاقدیس ازگله و کردی قاسمان با جریان ورودی از ۶۵/۵۷ تا ۸۰۰ لیتر بر ثانیه مشخص شد (شکل ۳). سپس ویژگی ساختارهای زمین‌شناسی در هر پهنه با جریان ورودی مقایسه شده است.

### موقعیت جغرافیایی قطعه دوم تونل زاگرس

تونل انتقال آب زاگرس با طول ۴۹ کیلومتر و قطر ۶/۷۳ متر در غرب ایران در شمال غرب استان کرمانشاه در حال مطالعه و اجرا می‌باشد که بخشی از طرح تأمین انتقال آب به دشت‌های گرمسیری غرب کشور است. این تونل با شیبی معادل هشت در ده هزار (۰/۰۰۰۸) در استان کرمانشاه از رودخانه سیروان تا دشت ازگله امتداد خواهد داشت. ورودی تونل زاگرس در مختصات طول شرقی  $10^{\circ} 6' 34''$  و عرض شمالی  $30^{\circ} 10' 45''$  و خروجی آن در مختصات جغرافیایی طول شرقی  $11^{\circ} 51' 34''$  و عرض شمالی  $29^{\circ} 52' 45''$  واقع شده است (شکل ۴). تونل زاگرس در پهنه زاگرس چین‌خورده ساده قرار گرفته است و از واحدهای سنگ

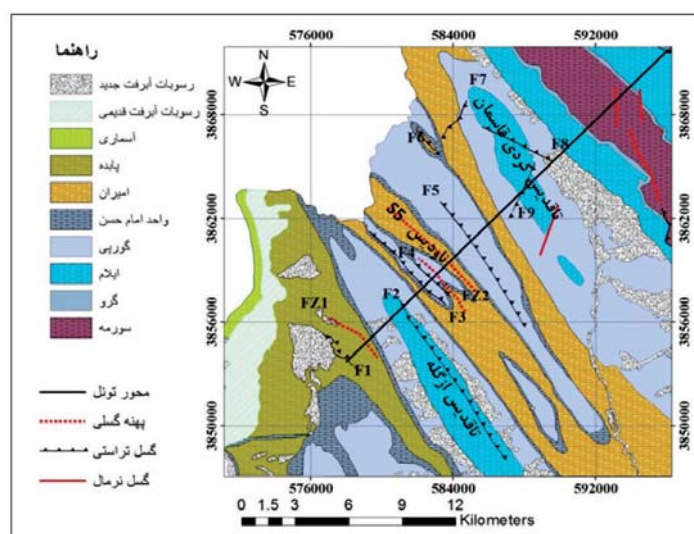


شکل ۳. مقطع طولی ۱۷/۴ کیلومتر از مسیر قطعه دوم تونل زاگرس (مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۸۵)

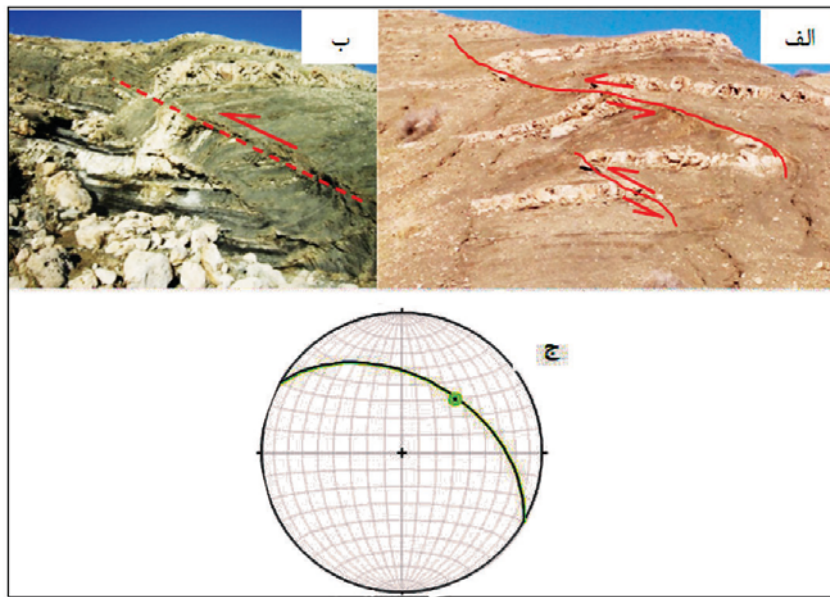


شکل ۴. موقعیت جغرافیایی قطعه دوم تونل زاگرس (تصاویر ماهواره‌ای Bing Map)

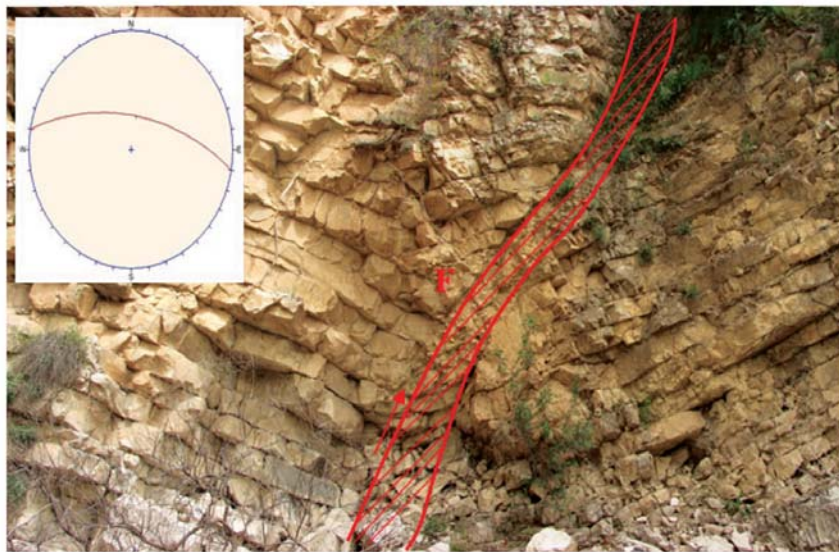
چند متر و درزه‌ها (که بیشتر در واحدهای سازند پابده دیده می‌شوند) هستند. از بین گسل‌های منطقه، گسل‌های F2، F9، F8 و پهنه گسله Fz2 گسل‌هایی هستند که در ورود آب به داخل تونل مؤثر بوده‌اند (شکل‌های ۶ و ۷). گسل‌های نرمال در واحدهای شیلی-آهکی سازند پابده به‌وفور دیده می‌شوند. این گسل‌ها، گسل‌های عمقی نمی‌باشند و در محور تونل تأثیرگذار نیستند (شکل ۸).



شکل ۵. نقشه زمین‌شناسی و ساختاری منطقه مورد مطالعه برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ باینگان و قصرشیرین با تغییر (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۸۸)



شکل ۶. الف) گسل‌های معکوس در رخنمون سازند پابده، ب) گسل معکوس F3 در گستره مورد بررسی (دید به سمت شمال)، ج) تصویر استریوگرافیک گسل F3



شکل ۷. رخنمون گسل F8 در سازند آهکی ایلام



شکل ۸. گسل‌های نرمال با جهت شیب به سمت شمال خاور در رخنمون واحد سنگی پابده (دید به سمت شمال باختر)

## بررسی ناپیوستگی‌ها

شرایط ناپیوستگی‌ها از جمله مهم‌ترین شاخصه‌های یک واحد سنگی هستند که به همراه خصوصیات ماده سنگ تعیین‌کننده رفتار مکانیکی توده‌های سنگی می‌باشند. سطوح لایه‌بندی، درزه‌ها و گسل‌ها، سطوح اصلی ناپیوستگی توده‌های سنگی هستند. به‌طور کلی جریان در شکستگی‌ها، به‌عنوان جریان بین صفحات موازی از هم جدا شده تجسم می‌شود (Snow, 1965; Iwai, 1976). تعیین شرایط ناپیوستگی توده‌های سنگی نیز مستلزم برداشت و بررسی خصوصیات ناپیوستگی‌ها شامل جهت‌داری، فاصله‌داری، تداوم، بازشدگی، جنس مواد پرکننده، درجه هوازدگی سطوح درزه‌ها، زبری و موج‌داری سطوح درزه و ... می‌باشد.

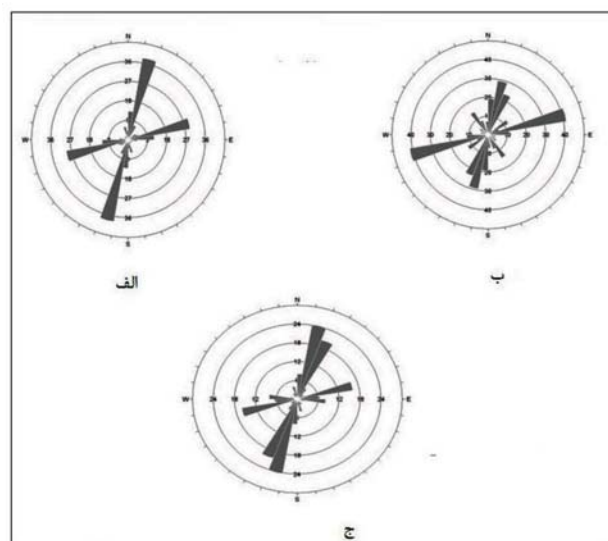
## شرایط ناپیوستگی‌ها در تاقدیس ازگله

مهم‌ترین شاخصه ناپیوستگی‌ها در این محدوده وجود برخی آثار انحلالی در ناپیوستگی‌های موجود در واحد آهکی سازند ایلام می‌باشد. از دیگر خصوصیات مهم ناپیوستگی‌های این بخش عملکرد ناپیوستگی‌های واحد آهکی است که باعث شده توده‌های سنگی این واحد به‌صورت بلوک‌های مکعب مستطیلی با ابعاد ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر خرد شوند.

## شرایط ناپیوستگی‌ها در تاقدیس کردی قاسمان

وجود دسته درزه‌های با جهت شیب ۳۲۰ تا ۳۴۰ و ۱۴۰ تا ۱۶۰ با شیب زیاد ۸۰ تا ۹۰ درجه است که به نظر می‌رسد درزه‌های کشتی مرتبط با چین‌خوردگی باشند. این درزه‌ها دارای بازشدگی بسیار زیاد در سطح می‌باشند (بیش از یک متر) که به نظر می‌رسد با توجه به روباره کم تونل در این بخش، این درزه‌ها آب سطحی و زیرزمینی را به تونل منتقل نمایند (شکل‌های ۹ و ۱۰).

در واقع خطواره‌های زمین‌شناسی را می‌توان شکستگی‌های نزدیک به سطح زمین که از آن‌ها در شناسایی و تحلیل بهتر منطقه از لحاظ سنگ‌شناسی و ساختاری استفاده می‌شود، تعریف کرد. در این مطالعه ارتباط بین میزان جریان ورودی به تونل زاگرس و تراکم شکستگی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. براساس شکل ۱۱، که تراکم شکستگی‌ها در بخش‌هایی از مسیر تونل در تاقدیس‌های ازگله و کردی قاسمان زیاد می‌باشد، هدایت هیدرولیکی بالا و به‌تبع آن در این دو تاقدیس دی‌های واقعی اندازه‌گیری شده نیز بسیار بالا بوده است. در مترآزهای ابتدایی تونل، به علت وجود روباره بسیار کم و بازشدگی زیاد درزه‌ها، آب‌های سطحی و زیرسطحی به‌راحتی به درون تونل نفوذ می‌کنند. با این وجود به دلیل نبود ذخیره بالا و آبخوان‌های توسعه‌نیافته در این محدوده، میزان جریان ورودی آب در حد بحرانی نبوده است.



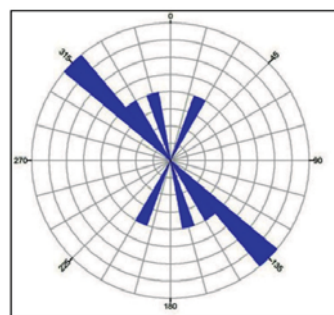
شکل ۹. نمودار گل‌سرخ‌های ناپیوستگی‌های موجود در مسیر تونل، الف) بین گسل‌های F3 و F4، ب) بین گسل‌های F4 و F5، و ج) بعد از گسل F5.

زیرسطحی گاهی به صورت چشمه‌های کوچک و فصلی نمایان می‌شوند ولی دلیلی بر وجود آبخوان نیستند.

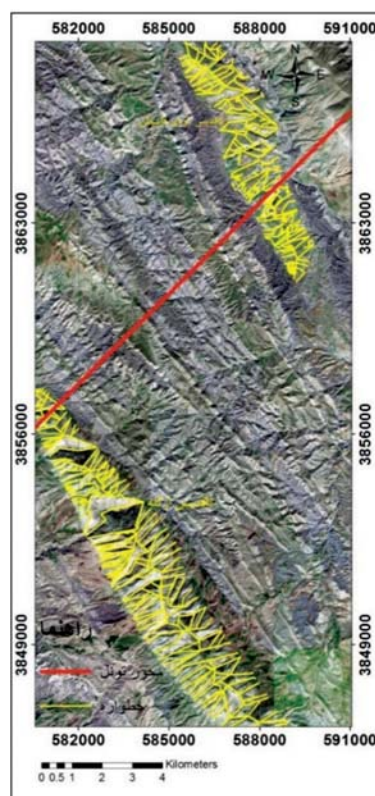
دبی ورودی به تونل نشان داد که علاوه بر پارامترهای هیدرولیکی محیط، وضعیت ساختارهای موجود (ناودیس‌ها و پهنه‌های گسله) در مسیر تونل نیز نقش مهمی در مقدار آب ورودی به تونل دارند. علیرغم لیتولوژی سازندها که نفوذپذیری کمی دارند و انتظار حجم آب زیادی از آن‌ها نمی‌رود، اما حجم آب ورودی به تونل نشان می‌دهد که تغییرات ناگهانی دبی ورودی در این چین‌ها مربوط به پهنه‌های خرد شده، گسل‌ها و شکستگی‌ها می‌باشد. ساختارهای زمین‌شناسی همانند تاقدیس‌ها، ناودیس‌ها، پهنه‌های گسلی و شکستگی‌های باز می‌توانند عامل مهمی در ورود جریان آب زیرزمینی به داخل تونل باشند. این ساختارها رفتارهای هیدرولیکی متفاوتی دارند و ممکن است به‌عنوان مجرایبی برای عبور جریان و یا به‌عنوان سدی در برابر جریان عمل کنند. در هنگام حفر تونل، ورود آب بیشتر از طریق درزه‌ها و گسل‌های موجود در مسیر حفر تونل بوده است و الگوی جریان بیشتر به صورت هجوم ناگهانی آب از طریق این معابر به داخل تونل گزارش شده است. نمودار شکل ۱۲ مقایسه دبی واقعی ورودی و ساختارهای مسیر قطعه دوم تونل زاگرس را نشان می‌دهد.

### تاقدیس ازگله

با توجه به داده‌های دبی اندازه‌گیری شده، میزان دبی در بخش‌های Hz6، Hz7، Hz8 و Hz9 افزایش یافته است (شکل ۱۲) که نشان می‌دهد تاقدیس ازگله با آب قابل توجه همراه بوده است. این تاقدیس از سازند ایلام-سروک تشکیل شده است. گسل F2 در این بخش عمل کرده است. با حفاری این بخش از تونل، بسیاری از چشمه‌ها (مانند چشمه‌های ژاله کوسه، اسپر، آبدالان و ...) خشک و یا کم آب شده‌اند (مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۸۵). شکستگی‌ها را می‌توان عامل مهمی در نشت آب به داخل تونل دانست (شکل ۱۳). در یال جنوب‌غربی و مرکز تاقدیس ازگله، توسعه و عمق شکستگی‌ها بیشتر از یال شمال شرقی است. این موضوع می‌تواند توجیه کننده اختلاف مقدار جریان نشتی به داخل تونل در دو یال ساختمان ازگله باشد.



شکل ۱۰. جهت لایه‌بندی غالب در قطعه دوم تونل زاگرس

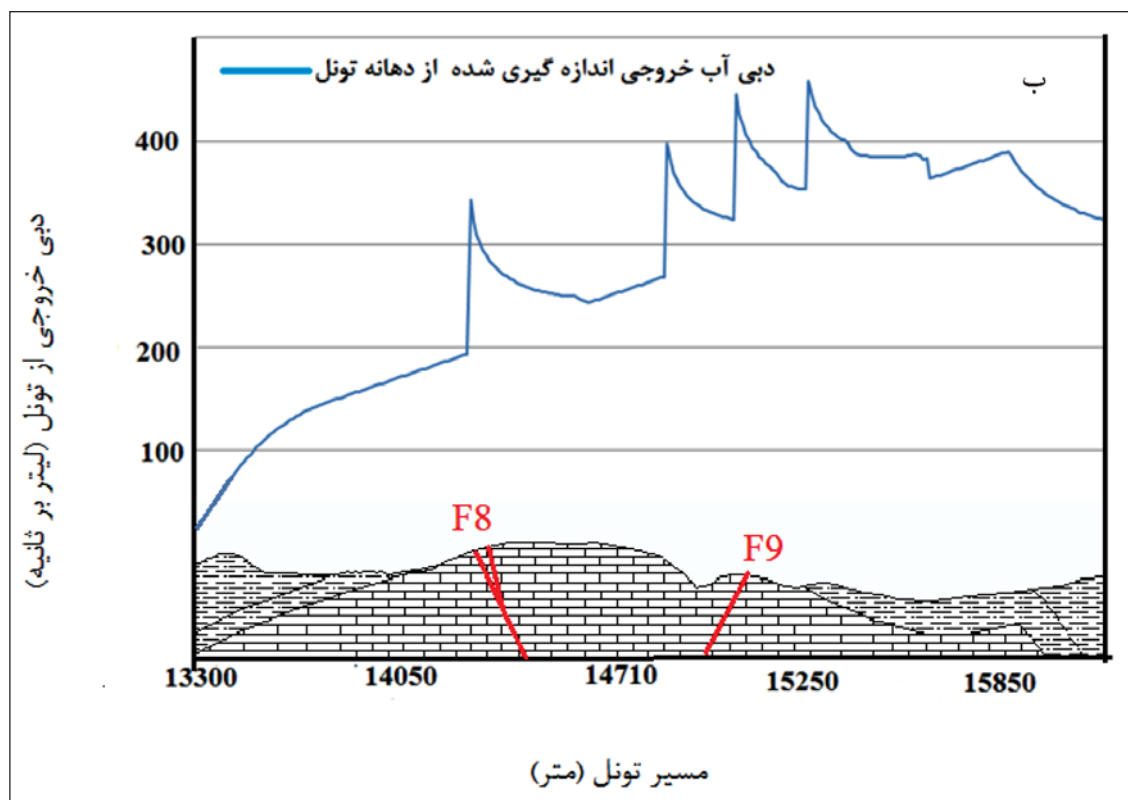
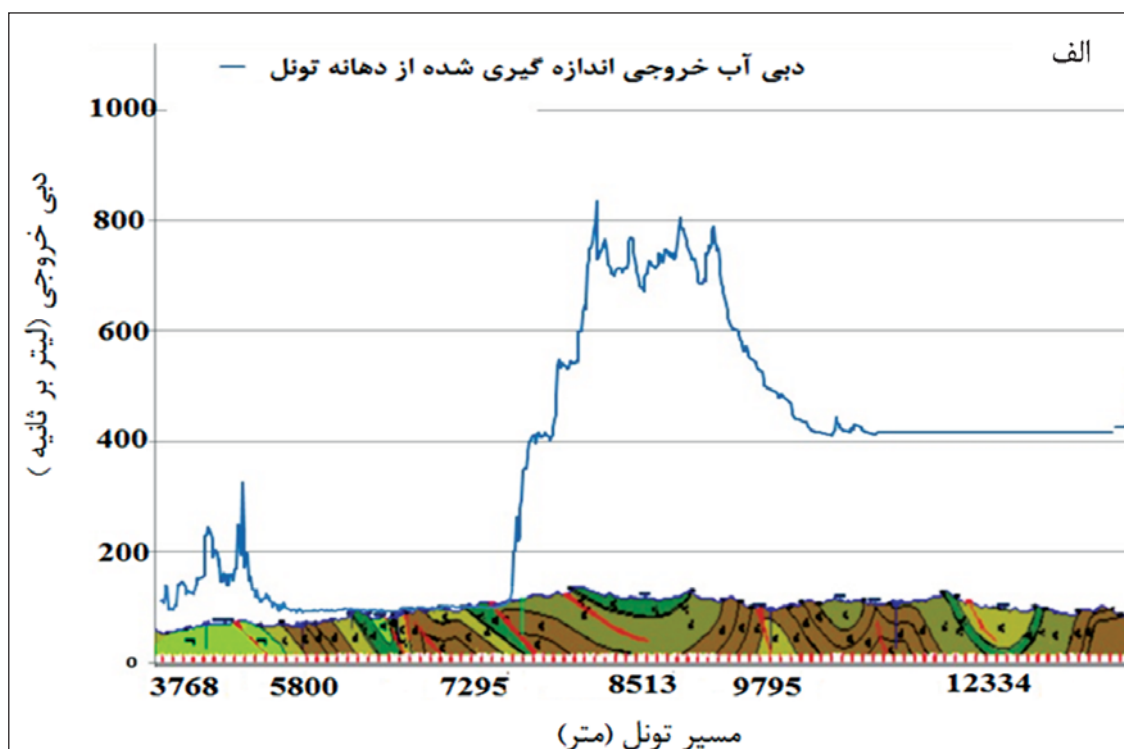


شکل ۱۱. خطواره‌های محدوده مورد مطالعه، استخراج شده از تصاویر لندست

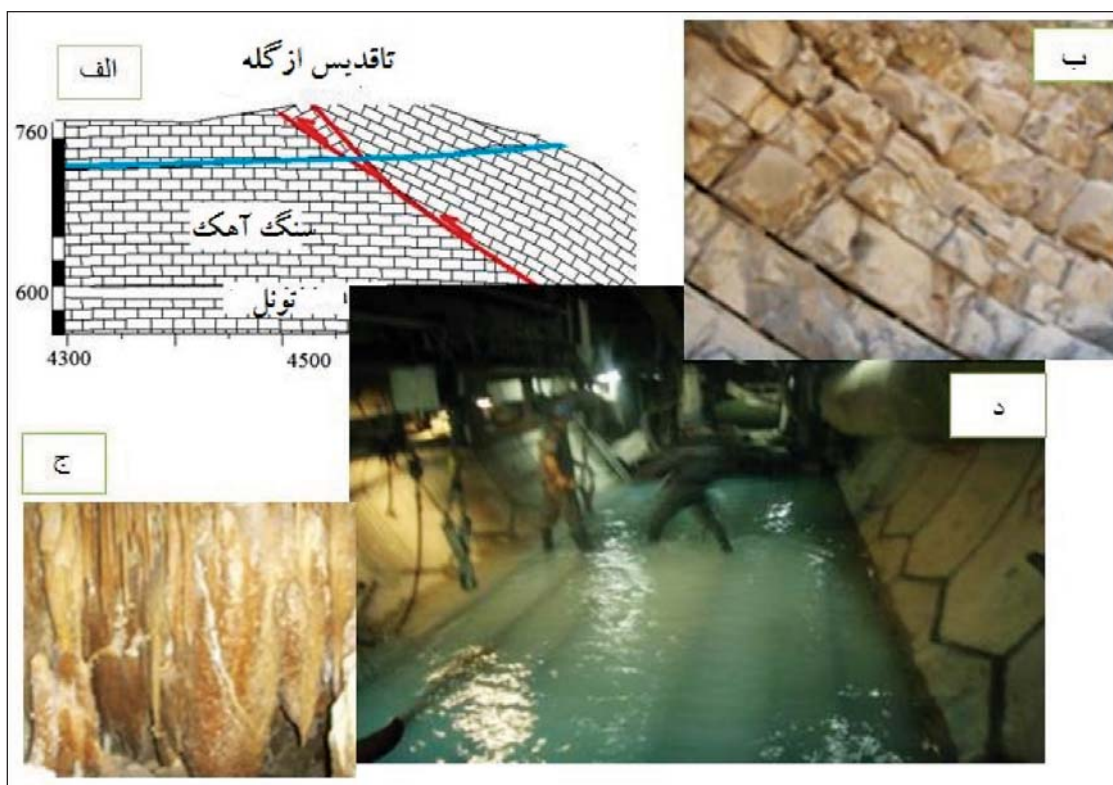
### بحث

با توجه به خصوصیات هیدرودینامیکی سازندهای منطقه، آهک‌های سازند ایلام و سایر واحدهای آهکی کرتاسه و ژوراسیک، پتانسیل ذخیره آب را دارند. سازندهای پابده و گورپی پتانسیل عبور دهی آب و تشکیل آبخوان زیرزمینی را ندارند و وجود سطح آب زیرزمینی در برخی نقاط در این سازندها، تحت تأثیر نفوذهای موضعی در لایه‌های سطحی و هوازده و تحت کنترل شکستگی‌ها می‌باشد. این آب‌های





شکل ۱۲. مقایسه دبی ورودی به تونل و ساختارهای زمین شناسی مسیر تونل الف) شروع تونل تا تاقدیس کردی قاسمان، ب) تاقدیس کردی قاسمان تا متر ۱۷/۴ کیلومتر



شکل ۱۳. الف) مقطع زمین‌شناسی تاقدیس ازگله، ب) شکستگی‌های سطحی در سازند ایلام، ج) غار کارستی موجود در تاقدیس ازگله و ورود آب زیرزمینی به داخل تونل (مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۸۵)

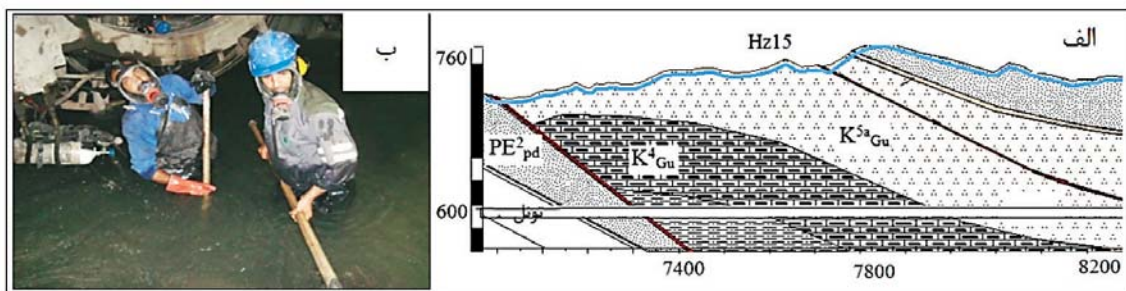
آب نشستی به تونل به تدریج کاهش می‌یابد. به دلیل تناوب واحدهای شیلی و آهک‌های آرژیلیتی در واحد ۴ گورپی ( $K_{Gu}^4$ ) ورود آب به تونل به صورت متناوب، بوده به طوری که در واحدهای شیلی مقدار آب ورودی کاهش یافته است.

### تاقدیس کردی قاسمان

این تاقدیس از متر ۱۳۳۰۰ تا ۱۶۳۰۰ می‌باشد که پهنه‌های Hz21، Hz22، Hz23، Hz24 و Hz25 را در بر گرفته است. از موارد مهم و قابل توجه دیگر بالا بودن سطح آب زیرزمینی در ناحیه در بردارنده تاقدیس کردی قاسمان نسبت به تاقدیس ازگله است. سطح آب گمانه‌های حفر شده در تاقدیس ازگله پایین‌تر از سطح آب زیرزمینی گمانه‌های حفر شده بر روی تاقدیس کردی قاسمان است که نشان‌دهنده ارتفاع بیشتر ستون آب روی محور تونل در هنگام عبور از آن می‌باشد. از جمله این دلایل می‌توان به وجود رودخانه کردی قاسمان به عنوان تغذیه‌کننده آبخوان

### پهنه 15 Hz

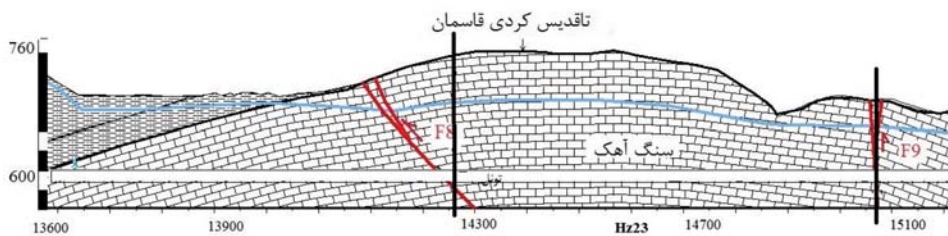
با توجه به خصوصیات هیدرودینامیکی سازند گورپی که پتانسیل عبور آب و تشکیل آبخوان دائمی را ندارد، واحد ۴ گورپی ( $K_{Gu}^4$ ) از آهک رسی ضخیم لایه به همراه شکستگی‌های فراوان تشکیل شده است که می‌تواند میزبان تشکیل لایه آبدار باشد، به طوری که آب حاصل از ریزش‌های جوی از طریق درز و شکاف‌های این واحد نفوذ کرده و در شکستگی‌ها و حفرات این واحد سنگی انباشته می‌شود (شکل ۱۴، الف). واحد ۴ گورپی ( $K_{Gu}^4$ ) با داشتن درز و شکاف‌های فراوان پتانسیل ذخیره آب را دارد، اما توسعه کارست و سیستم جریان کانالیزه و مجرای در آن‌ها دور از انتظار است. با توجه به قرارگیری سینه کار در پهلولی جنوبی ناودیس 5S، به لحاظ توسعه درز و شکاف‌ها از نوع کششی به همراه بازشدگی، نواحی فعالی از لحاظ ورود آب به داخل تونل فراهم شده است. با گذر از این واحد و محدود بودن حجم مخزن لایه‌های آبدار پس از مدت کوتاهی دبی



شکل ۱۴. الف) مقطع زمین‌شناسی در پهنه 15Hz، ب) حجم زیاد آب ورودی به تونل و ایجاد مشکل برای کارکنان (مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۸۵)

از منطقه، وجود سه دسته درزه به شرح زیر در تاق‌دیس کردی قاسمان را معرفی می‌کند (Milanovic, 2007):  
دسته درزه J1 که شامل درزه‌های تقریباً قائم با پرتلاشی کلسیت می‌باشد و دسته درزه‌های J2 و J3 با شیب ۵۰ و ۸۰ درجه و زاویه میل نزدیک قائم و فاصله 10-30 m، که J2 تونل را با زاویه ۳۰ درجه قطع می‌کند و J3 عمود بر مسیر تونل است.  
وجود این سیستم درزه و گسل‌های موجود در دره‌های این تاق‌دیس، معابر مناسب برای نفوذ آب به داخل سازند گرو و توسعه و گسترش کارست را فراهم می‌سازد.

و همچنین گسترش واحدهای کربناتی گورپی و گرو در آن محدوده اشاره کرد. با توجه به مشاهدات صحرائی در تمامی این واحدها دبی ورودی به تونل بالا بوده است. با توجه به شکل ۱۵ در پهنه Hz23 که گسل F8 قرار دارد دبی ورودی به ۸۱۷ لیتر بر ثانیه رسیده است. این تاق‌دیس همانند تاق‌دیس ازگله، کارستی است و از سازند ایلام-سروک تشکیل شده است. به علت درزه شدگی زیاد سنگ و بالا بودن سطح آب زیرزمینی در تاق‌دیس کردی قاسمان هجوم حجم زیاد آب به داخل تونل دور از انتظار نبوده است (شکل ۱۶). به‌طوری‌که میلانویچ در بررسی‌های به‌عمل‌آمده



شکل ۱۵. مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل زاگرس در تاق‌دیس کردی قاسمان و گسل‌های F8 و F9 (مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۸۵)

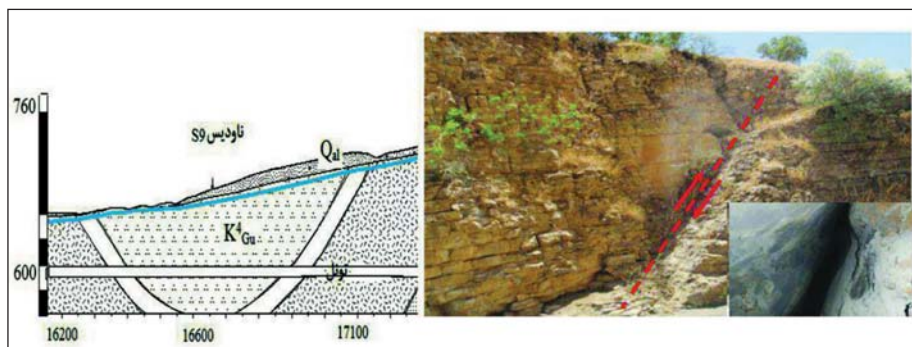


شکل ۱۶. الف) خروج جریان آب در امتداد بازشدگی‌های دیواره سمت راست تونل در محل تاق‌دیس کردی قاسمان (مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۸۵)، ب) واحدهای کربناتی در تاق‌دیس کردی قاسمان (دید به سمت غرب)

### پهنه‌های Hz26، Hz27 و Hz28

وجود گسل در این یال ناودیس وجود دارد که از جمله آن وجود ریز چین‌ها در نزدیکی این یال است و با توجه به کم شدن فاصله بین دو تاقدیس کردی قاسمان و زمکان در محل تنگه چشمه سرپهن شرب و وجود بهم‌ریختگی در این ناودیس، قابل ردیابی است. به دلیل پوشیده بودن منطقه به‌وسیله آبرفت‌ها روند این گسل مشخص نمی‌باشد.

با توجه به این‌که دبی ورودی در محل این پهنه‌ها افزایش پیدا کرده است، احتمال می‌رود که این افزایش دبی مرتبط با گسل موجود (شکل ۱۷) در این پهنه‌ها باشد. با توجه به وضعیت توپوگرافی زمین، رودخانه کردی قاسمان بر روی یال جنوبی ناودیس S9 جریان دارد (شکل ۱۸). شواهدی از



شکل ۱۷. موقعیت گسل Fa3 در امتداد رودخانه کردی قاسمان و بازشدگی قابل توجه آن (مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۸)



شکل ۱۸. نمایی از روند گسل موجود در هسته ناودیس S9 در محل رودخانه کردی قاسمان (مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۸)

### نتیجه‌گیری

آب فراهم کرده‌اند. هجوم جریان در تاقدیس ازگله مرتبط با گسل F2 و در تاقدیس کردی قاسمان مرتبط با گسل‌های F8 و F9 بوده است به طوری‌که در پهنه Hz23 به دلیل وجود گسل F9 دبی ورودی به ۸۰۰ لیتر بر ثانیه می‌رسد. هنگام عبور تونل از ناودیس S5 شکستگی‌های کششی در

بررسی‌های انجام شده در تونل زاگرس نشان می‌دهد که حجم زیادی از جریان آب ورودی به تونل به صورت متمرکز از درزه‌ها و یا پهنه‌های گسله و خرد شده صورت می‌گیرد که این پهنه‌ها کارستی می‌باشند. ساختارهای زمین‌شناسی همانند گسل‌ها و شکستگی‌های باز، معابر مناسبی را برای ورود

rock, Sweden. In: Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, Vancouver.

- Goel, R.K., 2014. Tunnelling through weak and fragile rocks of Himalayas. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, 783-790.

- Hernqvist, L., Butron, Ch., Fransson, Å., Gustafson, G. and Funehag, J., 2012. A hard rock tunnel case study: Characterization of the water-bearing fracture system for tunnel grouting, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 132-144.

- Iwai, K., 1976. Fundamental studies of fluid flow through a single fracture. Ph.D. Thesis, UC, Berkeley

- Lin, H. I. and Lee, C.-H., 2009. An approach to assessing the hydraulic conductivity disturbance in fractured rocks around the Syue-shan tunnel, Taiwan. *Tunneling and Underground Space Technology*, 24, 222-230.

- Milanovic, P., 2007. Nowsoud Water Conveyance Tunnel Project. Mission Report, Iran Water and Power Resources Development Company.

- Palmstrom, A. and Stille, H., 2007. Ground behavior and rock engineering tools for underground excavations. *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 22, 363-376.

- Riedmuller, G., 1987. Neo formation and transformation of clay minerals in tectonic shear zones. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*, 25, 219-242.

- Shahriar, K., Sharifzadeh, M. and Khadem, H.J., 2008. Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. *International journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 23, 318-325.

پهلوی جنوبی این ناودیس که به صورت مجاری انتقال آب عمل کرده‌اند، باعث هجوم حجم بالای آب زیرزمینی به تونل شده‌اند. بنابراین ساختارهای اصلی زمین‌شناسی مانند ساختار تاقدیس‌ها، ناودیس‌ها، پهنه گسلی و شکستگی‌های باز، اثرات متفاوتی بر روی جریان ورودی به تونل داشته‌اند. جهت جریان آب زیرزمینی در تاقدیس‌های ازگله و کردی قاسمان منطبق بر جهت به‌دست‌آمده از طریق نمودار گلسرخی حاصل از ناپیوستگی‌های برداشت شده در صحرا می‌باشد.

## منابع

- رفیعی، ر.، رمضان زاده، ا.، سرشکی، ف. و موحدی نژاد، ا.، ۱۳۹۲. بررسی تاثیر خصوصیات درزه‌ها بر روی جریان پایدار آب ورودی به تونل مطالعه موردی: تونل سوم کوه‌رنگ. نشریه مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی. دوره دو، شماره دو.

- شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۸۸. نقشه زمین‌شناسی باینگان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.

- شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۸۸. نقشه زمین‌شناسی قصر شیرین با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.

- مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۸۵. گزارش زمین‌شناسی تکمیلی، هیدروکلیماتولوژی، هیدروژئولوژی، آماربرداری ادواری گمانه‌ها و منابع آب زیرزمینی مسیر تونل انتقال آب زاگرس.

- مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۸. گزارش مطالعات هیدروژئولوژی مسیر قطعه دوم تونل زاگرس.

- Berkowitz, B., 2002. Characterizing flow and transport in fractured geological media: A Review. *Advances in Water Resources*, 25, 861-884.

- Butron, C., 2009. Drip sealing of tunnels in crystalline rock: Pre-excavation design and evaluation. Licentiate thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg.

- Fransson, A. and Hernqvist, L., 2010. Geology, water inflow and grout selection for tunnel sealing: case studies from two tunnels in hard

- Snow, D.T., 1965. A parallel plate model of fractured permeable media. Ph.D Thesis, UC, Berkeley.
- Wenner, H. and Wannenmacher, D., 2009. Alborz service tunnel in Iran: TBM tunneling in difficult ground conditions and its solutions. In: Proceedings, 8th Iranian Tunneling Conference, 342-353.
- Zarei, H.R., Uromeihy, A. and Sharifzadeh, M., 2011. Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features. Journal of Tunneling and Underground Space Technology, 26, 364-373.