

# رفتار هیدرودینامیکی سازند آهکی سورمه در جریان ورودی آب به تونل نوسود در گستره دره زیمکان، کرمانشاه

حمیدرضا ناصری<sup>۱</sup>، نرگس بیات<sup>۲(\*)</sup> و جواد عزتی فیض<sup>۳</sup>

۱. استاد گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۲. دانشجوی دکتری آب‌های زیرزمینی، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب‌شناسی، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۷

## چکیده

کنترل آب‌های زیرزمینی مسئله مهمی در طی حفاری‌های زیرزمینی در سنگ‌های درزه‌دار است. نبود کنترل آب‌های زیرزمینی می‌تواند باعث تأخیر در حفاری‌های زیرزمینی و افزایش هزینه‌ها شود. در این پژوهش اطلاعات مربوط به آب نفوذی به تونل نوسود در دره زیمکان با تحلیل منحنی فرود دبی خروجی به منظور تعیین ویژگی‌های سیستم کارستی سازند سورمه در آبخوان زیمکان استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که رفتار منحنی فرود جریان خروجی تونل مشابه با تخلیه چشمه‌های کارستی با سیستم مجرای غالب است. شیب منحنی فرود در هفت روز ابتدایی زیاد و برابر ۰/۴۱ بوده است، ولی به مرور زمان و پیشرفت حفاری و افت ۴۱ متری سطح آب در آبخوان کارستی سازند سورمه، شیب منحنی فرود کم و شبیه به تخلیه سیستم افشان محیط کارستی شده است. در نمودار فرود دبی تونل نوسود هر سه سیستم تخلخل مجرای، شکستگی و زمینه به ترتیب با زمان‌های هفت، ۴۸ و ۸۷ روز به خوبی قابل تفکیک است. با توجه به شباهت تغییرات جریان خروجی تونل با تغییرات دبی چشمه‌های کارستی، از هیدروگراف آب نفوذی به تونل می‌توان به عنوان تخلیه در زیر تراز سطح اساس سیستم هیدرولوژیک کارست برای برآورد ذخیره دینامیک بخش بالایی مخزن کارست (بالا تر از تراز تونل) استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان کارستی، تونل انتقال آب نوسود، جریان مجرای، منحنی فرود.

## مقدمه

ناصری و همکاران (۱۳۹۷) با ارزیابی جریان‌های مقطعی آب زیرزمینی با دبی بالا در ۱۷/۴ کیلومتر ابتدایی قطعه دوم تونل نوسود نتیجه گرفتند، حجم زیادی از جریان آب ورودی به تونل به صورت متمرکز از درزه‌ها و یا پهنه‌های گسله و خرد شده صورت می‌گیرد. ساختارهای زمین‌شناسی همانند گسل‌ها و شکستگی‌های باز معابر مناسبی را برای ورود آب فراهم کرده‌اند. بنابراین ارزیابی جریان، بر اساس ویژگی‌های

ورود آب‌های زیرزمینی به تونل‌ها می‌تواند دارای خطر بالقوه باشد و همچنین یکی از عوامل مؤثر در کاهش سرعت حفاری تونل است (Li et al., 2009). برآورد مناسب از میزان جریان ورودی به تونل در انتخاب تراز تونل، تزریق، نصب پوشش، برنامه زمان‌بندی و برآورد هزینه حفاری اهمیت زیادی دارد (Fernandez and Moon, 2010).

\* نویسنده مرتبط: Nbayat87@yahoo.com

منابع آب، کارست به طور روزافزون مورد توجه قرار دارد. از جمله این مطالعات، شناخت ویژگی های کارست براساس، شاخص های هیدروگرافی چشمه ها است، پژوهشگرانی همچون (Komac, Atkinson (1997)، (1993)، (2006) Mudry، (1993) Bonacci، و (1990) Korkmaz به این موضوع پرداخته اند. بیشتر این مطالعات که دارای تحلیل هیدروژئولوژیک می باشند به نوعی دنباله رو مدل هیدروتکنیکی مایلت (Maillet, 1905) هستند.

در مرداد ماه ۱۳۹۴ با برخورد متنه TBM به مجرای کارستی سازند سورمه در هنگام حفاری تونل نوسود، هجوم آب به تونل با دبی اولیه حدود ۴/۷ متر مکعب در ثانیه رخ داد. به مرور زمان دبی آب خروجی از تونل با افت سطح آب در حریم تونل کاهش یافت به طوری که در خرداد ماه ۱۳۹۵ دبی خروجی از تونل به ۱/۳ متر مکعب در ثانیه رسید.

هدف اصلی این پژوهش بررسی متغیرهای کلیدی در ورود آب به قطعه دوم تونل زاگرس می باشد که موجب هجوم جریان ناگهانی به داخل تونل شده است. به این منظور ابتدا ضرایب تخلیه با استفاده از منحنی فرود تعیین شد. سپس نمودار گل سرخی درزه های برداشت شده صحرایی در دره زیمکان با نمودار گل سرخی خطواره های استخراج شده حاصل از تصاویر ماهواره ای مقایسه شده اند. همچنین دبی در ماه های مختلف حفاری مورد بررسی قرار گرفت. حداکثر دبی ۴۱۵۶/۳۹ لیتر در ثانیه در متر اژ ۱۸۹۰۰ می باشد (مهندسین مشاور ایمن سازان، ۱۳۹۴، الف) که کانال های کارستی و گسل ها عامل اصلی هدایت کننده آب زیرزمینی می باشند. دبی آب ورودی به قطعه دوم تونل زاگرس توسط متغیرهای مختلفی کنترل می شود و پیچیدگی های زیادی را به همراه داشته است.

### موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به گستره مورد مطالعه

گستره مورد نظر از نظر تقسیمات کشوری در شمال غربی استان کرمانشاه و در نزدیکی مرز ایران و عراق واقع شده است. گستره بیشتر کوهستانی و در شمال غرب کرمانشاه و باختر پاره در ناحیه مرزی قرار دارد. راه اصلی

ساختارهای زمین شناسی نسبت به روش های تحلیلی و تجربی مناسبتر است (Zarei et al., 2011).

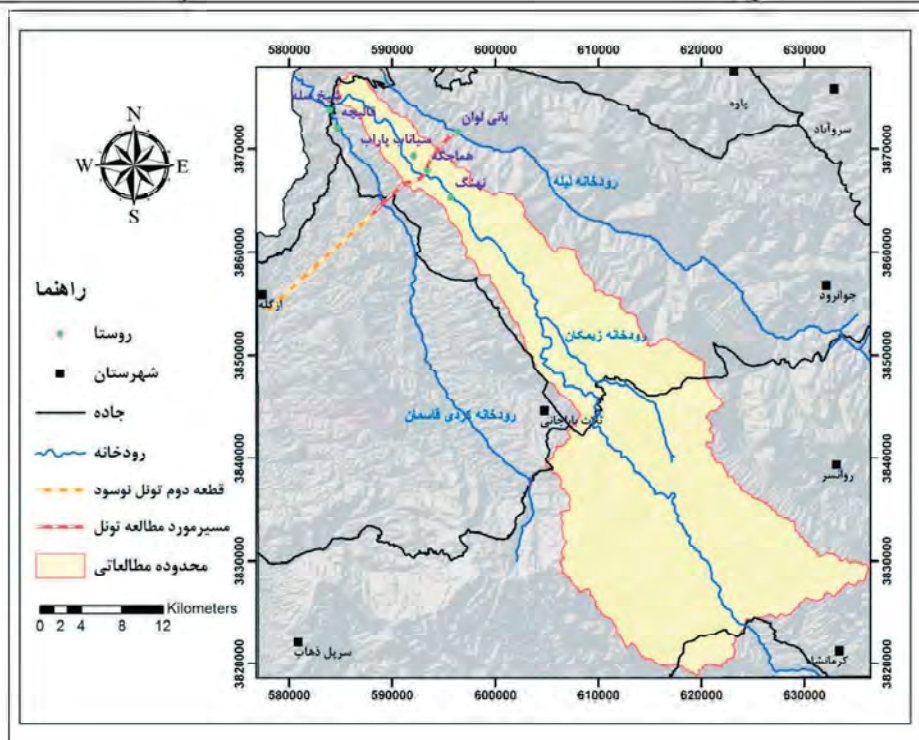
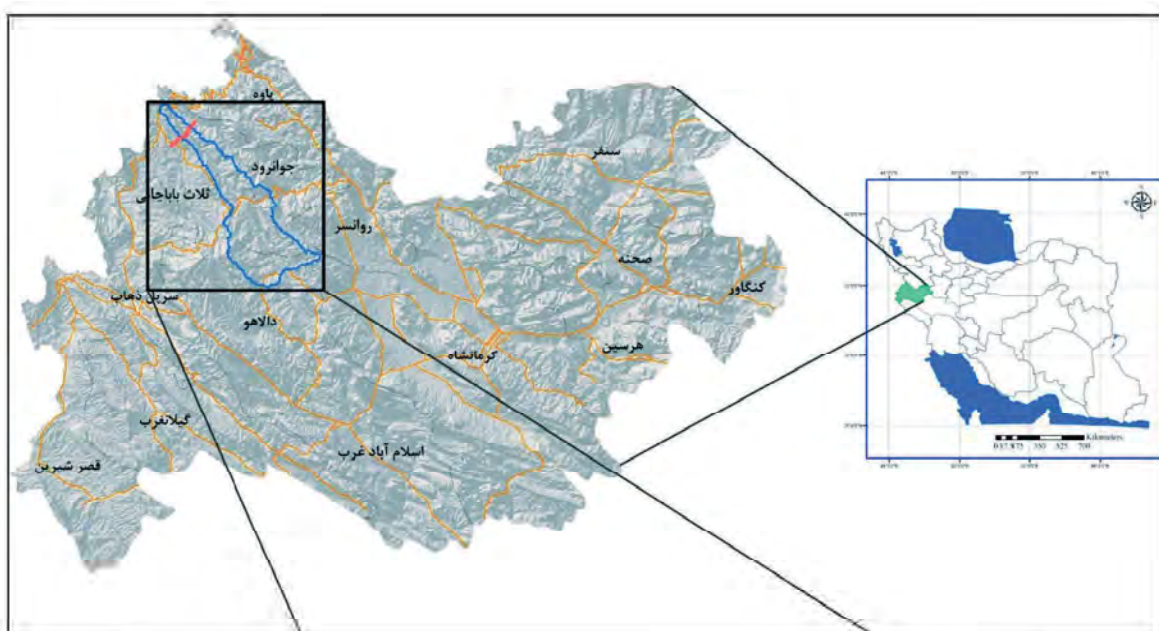
پیش بینی آب ورودی به تونل در مناطق کارستی پیچیدگی های زیادی دارد و شامل مسائل هیدروژئولوژی، زمین شناسی مهندسی، تکنولوژی ساخت و مکانیک سنگ است (Li and Li, 2014). رویه های فعلی برای تخمین آب ورودی به تونل با استفاده از روش های تحلیلی و تجربی است و شامل فرضیات ساده کننده محیط متخلخل همگن و ایزوتروپ اطراف تونل که جریان را به صورت خطی فرض می کند، است. اما در کارست بیشتر جریان به صورت آشفته و غیرخطی است (Zhang and Chen, 1988). شناخت تقاطع شکستگی ها در مطالعات کارست به سبب تمرکز جریان آب زیرزمینی در محل تقاطع اهمیت دارد، زیرا در محل تلاقی نفوذ بیشتر می شود و به همراه آن کارست بیشتر توسعه می یابد. اغلب فروچاله ها و حفرات کارستی، در پهنه های کارستی به این صورت تشکیل می شوند.

ارزیابی روش های تحلیلی و تجربی در برآورد آب ورودی به قطعه دوم تونل زاگرس نشان داد، این روش ها در پهنه های کارستی از دقت لازم برخوردار نیستند (بیات، ۱۳۹۴) و می توانند موجب تأخیر در حفاری و افزایش هزینه شوند. حفاری تونل ها در پهنه های کارستی و آبدار با مجاری و کانال های زیرزمینی، با مشکل هجوم ناگهانی آب زیاد به داخل تونل در هنگام حفاری روبرو می باشند. برخورد به لایه های کارستی در هنگام حفاری باعث به وجود آمدن مشکلات پیش بینی نشده، غرقاب شدن تونل، وارد شدن خسارت به تجهیزات ساخت تونل و کارکنان، کند شدن روند حفر تونل و در نهایت توقف عملیات اجرایی می شود.

تونل های انتقال آب کوه رنگ (Foladgar, 2003-Zarei et al., 2012) و سبزه کوه در استان چهارمحال و بختیاری و تونل نوسود در استان کرمانشاه (Shahriar et al., 2008) نمونه هایی از تونل های درگیر با مشکلات سازندهای کارستی در ایران می باشند. از این رو بررسی کارست در مسیر تونل ها از جمله مسائلی است که باید برای آن اهمیت ویژه ای قائل شد. در چند دهه اخیر به علت پدید آمدن مشکلات کم آبی و ارتباط پدیده های کارستی با مسائل

واقع شده است. خروجی آن در مختصات جغرافیایی طول شرقی "۱۱°۵۱'۳۴" و عرض شمالی "۴۹°۵۲'۴۵" واقع شده است و در فاصله تقریبی ۳۰۰ متری شمال غرب روستای بانیلوان قرار دارد.

برای دسترسی به گستره مورد مطالعه، راه آسفالتی کردی قاسمان به هماغه است که در بخشی از مسیر به صورت خاکی ادامه می‌یابد (شکل ۱). ورودی تونل نوسود در مختصات طول شرقی "۱۰°۴۶'۳۴" و عرض شمالی "۳۰°۱۰'۴۵" که در فاصله تقریبی دو کیلومتری جنوب شرقی بخش ازگله

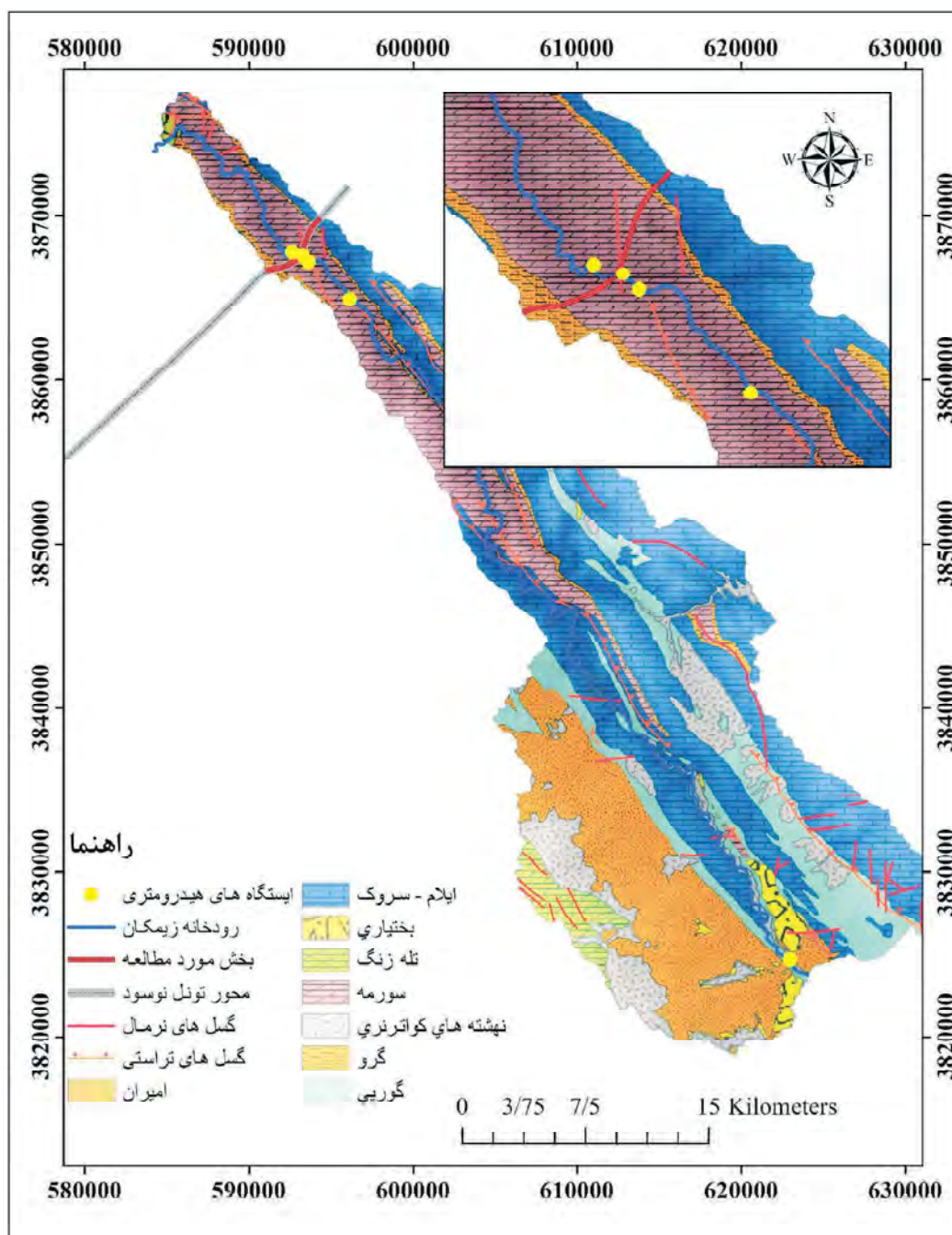


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی قطعه دوم تونل نوسود

## زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

مارنی متوسط لایه تا نازک لایه که گاهی با میان لایه‌هایی از تبخیری‌ها (انیدریت) و شیل سازند نیریز همراه است که مشخص‌ترین واحد سنگی در گستره مورد مطالعه است (آقانباتی، ۱۳۸۳). واحدهای آهکی ژوراسیک شامل سازند آهکی سورمه، شیل‌های گورپی، آهک ایلام، آهک رسی نازک لایه و شیل‌های گرو دیگر واحدهای سنگی در مسیر تونل می‌باشند (شکل ۲).

سازندهای زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه شامل واحدهای سنگی دوران دوم و سوم و رسوبات کواترنری هستند. دولومیت با میان لایه‌های آهک مارنی و شیلی و برش‌های توده‌ای سازند خانه‌کت، قدیمی‌ترین واحد سنگی واحد رخنمون یافته در گستره مورد مطالعه است و در هسته تاقدیس زیرمکان رخنمون دارد. سنگ مارن و آهک

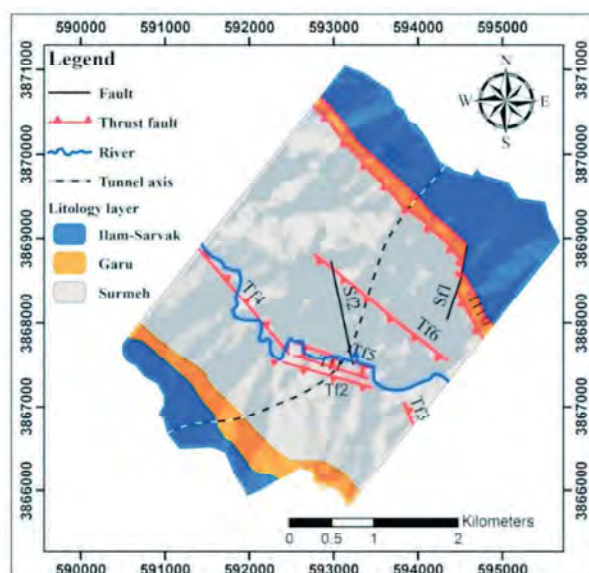


شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه (سازمان زمین‌شناسی کشور ۱۳۸۶، شرکت ملی نفت ایران ۱۳۸۸)



کمتری برخوردارند. با بررسی‌های ساختاری و پیمایش‌های انجام شده توسط موسسه ایمن‌سازان، ۱۲ پهنه گسلی برداشت شده و دو پهنه گسلی امتدادلغز و ۱۰ پهنه گسلی به صورت راندگی است. شناسایی گسل‌ها با برداشت‌های دقیق سطحی انجام شده است که برخی دارای شواهد مستقیم و برخی با شواهد غیرمستقیم تشخیص داده شده‌اند. برخی گسل‌ها نیز با داده‌های زیرسطحی از جمله داده‌های حاصل از گمانه‌ها ژرف‌نگری شده‌اند. البته لازم به ذکر است برخی از این راندگی‌ها در نزدیکی محور تونل هستند و در نیم‌رخ تونل نشان داده نشده‌اند (شکل‌های ۳ تا ۵).

گستره مورد مطالعه تحت تأثیر حرکات تکتونیکی جوان کوهزاد زاگرس، گسل خوردگی و چین خوردگی پیدا کرده است. سطح محوری تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها اغلب قائم و امتداد آن‌ها شمال غرب به جنوب شرق است. شدت چین خوردگی در گستره قطعه دوم تونل زاگرس کمتر از گستره قطعه اول است. علت آن قرار گرفتن قطعه اول در پهنه زاگرس مرتفع می‌باشد که گسل‌های فشاری معکوس زیادی در آن ایجاد شده است. گستره مورد مطالعه تحت تأثیر گسلش راندگی و امتدادلغز متعدد قرار دارد. بیشتر گسل‌های واقع در مسیر تونل، گسل‌های معکوس می‌باشند و شیبی به سمت شمال شرق دارند. گسل‌های امتدادلغز از فراوانی



شکل ۳. موقعیت ساختارهای گستره محور تونل. (الف) مهندسین مشاور ایمن‌سازان ۱۳۹۴، (ب) مهندسین مشاور ایمن‌سازان ۱۳۹۴)

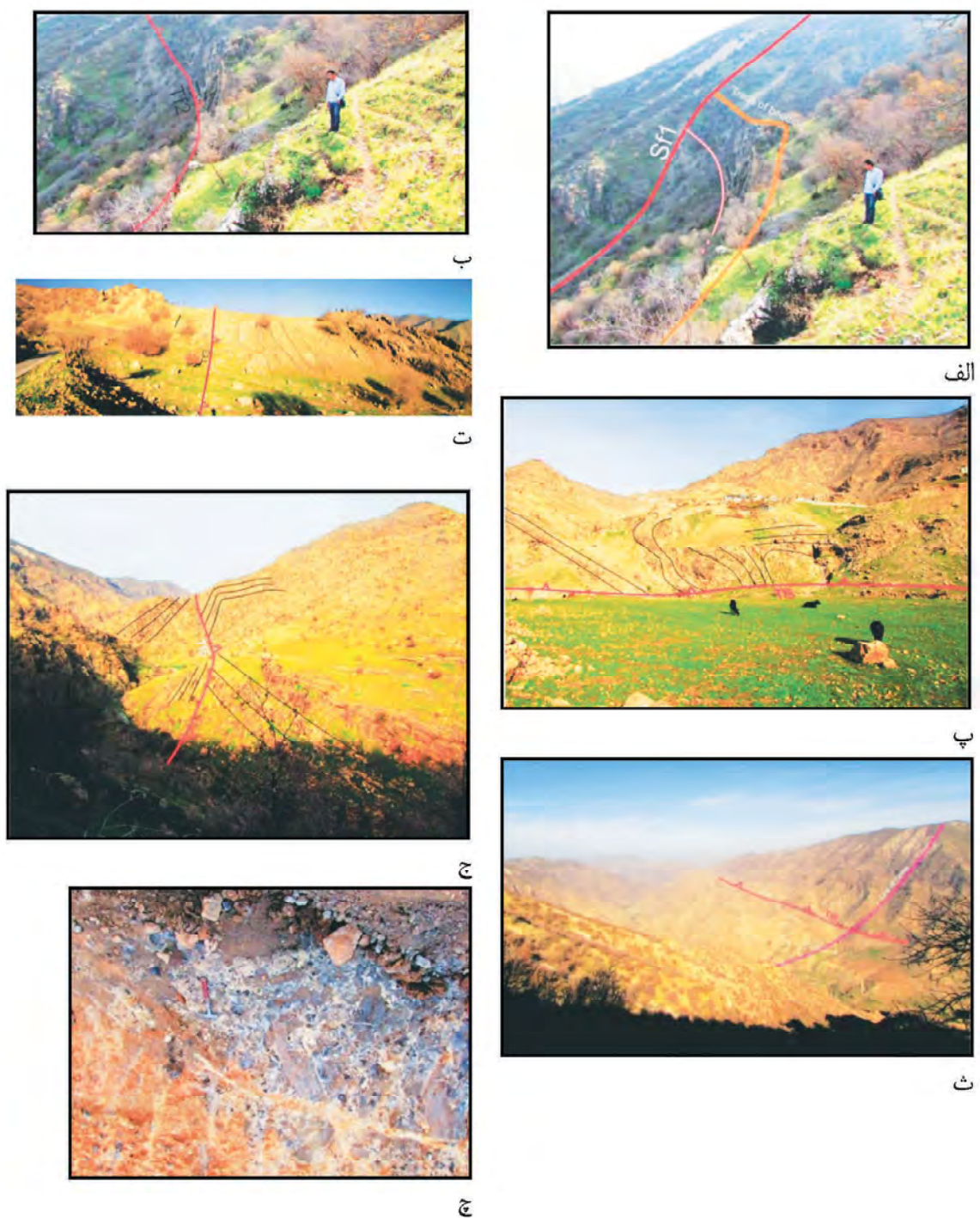
(Ramsay and Huber, 1987).

### هیدروژئولوژی گستره مورد مطالعه

آهک سازند ایلام و همچنین دولومیت‌های سازند سورمه در تاقدیس زیمکان با داشتن درز و شکاف‌های فراوان و وجود لایه شیل آهکی در زیر آن‌ها، بستر مناسبی را برای تشکیل آبخوان فراهم کرده‌اند. آبخوان‌های کارستی گستره مورد مطالعه در سازندهای کربناته ایلام-سروک با مساحت ۹۲/۱۵۳ کیلومتر مربع و سورمه با مساحت ۲۳۹/۵۴ کیلومتر مربع تشکیل شده‌اند.

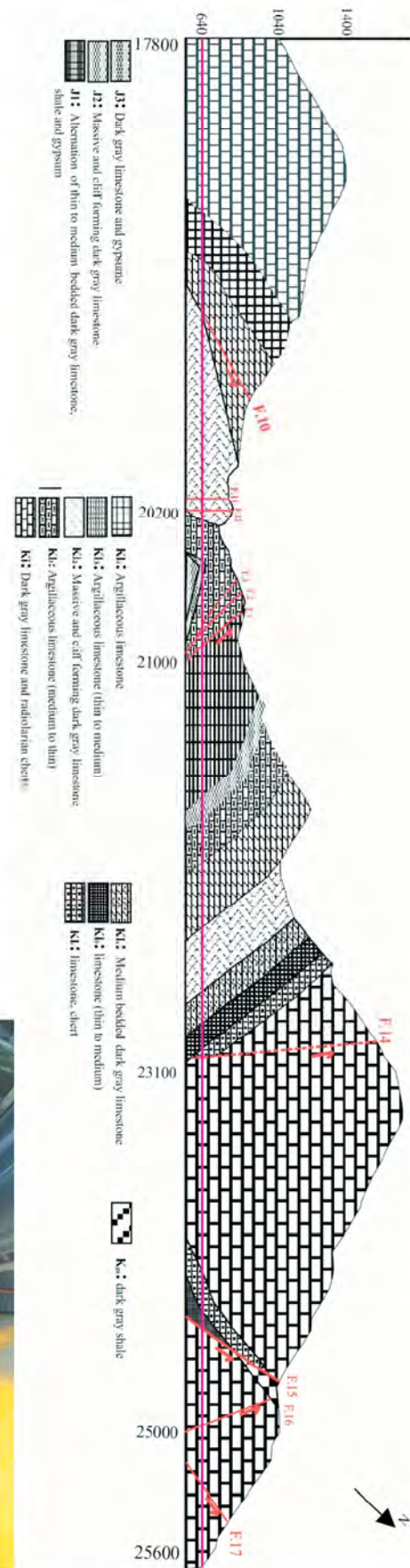
شاید یکی دیگر از ساختارها در گستره مورد مطالعه که باعث هجوم جریان آب به داخل تونل شده است، تشکیل سدل ریف می‌باشد. این ساختار شاید در تاقدیس زیمکان در فاصله بین ۲۰۲۰۰ تا ۲۱۰۰۰ وجود دارد و باعث ورود حجم زیادی از آب به داخل تونل شده است (شکل ۶). دو مکانیسم چین خوردگی مختلف برای دو سنگ با ویژگی‌های مکانیکی مختلف باعث ایجاد این ساختار می‌شود. در این حالت لایه بالایی با سازوکار جناغی و لایه پایینی به صورت مدور چین می‌خورد و باعث ایجاد یک فضای خالی می‌شود که معبر مناسبی برای جریان آب زیرزمینی را فراهم می‌کند. به این فضاهای خالی سدل ریف گفته می‌شود

1. Saddle reef

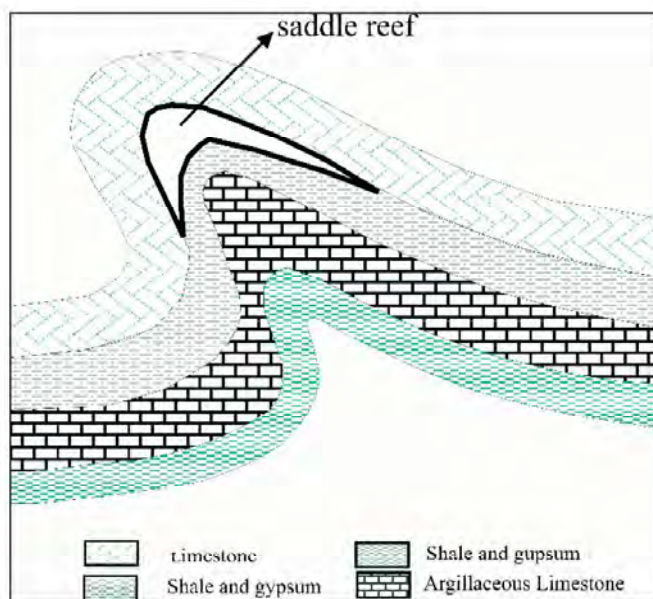


شکل ۴. الف) قطع شدگی امتدادی لایه‌ها پس از برخورد به پهنه گسلی SF1 (دید به سمت شرق)، ب) موقعیت راندگی TF2 (دید به سمت شمال غرب)، پ) موقعیت راندگی TF5 در جنوب روستای هماجگه (دید به سمت شرق)، ت) راندگی TF3 در فاصله حدود ۲ کیلومتری خاور محور تونل (باعث راندگی بخش‌های زیرین این واحد بر روی بخش‌های بالایی)، (دید به سمت جنوب شرق)، ث) موقعیت راندگی TF6 در شمال روستای هماجگه در مسیر تونل (دید به سمت شمال شرق)، ج) موقعیت راندگی TF5 در مجاور رودخانه زیمکان (دید به سمت شمال شرق)، چ) پهنه خرد شده راندگی (مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۹۴-الف، مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۹۴-ب، مهندسین مشاور پارس کانه کیش، ۱۳۸۵)

شکل ۵. مقطع تونل نوسود در گستره تاق‌دیس زیمکان (الف- مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۹۴، ب- مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۳) و آب‌ورودی به تونل







شکل ۶. شکل شماتیک سدل ریف

## روش مطالعه

بررسی داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری بالادست و پایین‌دست تونل نشان می‌دهد، بین رودخانه زیمکان و تونل نوسود ارتباط هیدرولیکی وجود دارد. زیرا میزان دبی آب رودخانه قبل و بعد از محور تونل به میزان ۰/۱ متر مکعب در ثانیه کاهش می‌یابد (جدول ۱) و حاکی از تغذیه آبخوان توسط رودخانه است. بنابراین زمانی که حفاری تونل در موقعیت زیر رودخانه قرار می‌گیرد، جریان ورودی به تونل جدول ۱. دبی اندازه‌گیری شده رودخانه زیمکان برحسب لیتر بر ثانیه (مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۹۴-الف، مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۹۴-ب)

| تاریخ اندازه‌گیری | ایستگاه هیدرومتری رودخانه زیمکان |      |      |      |     |
|-------------------|----------------------------------|------|------|------|-----|
|                   | شاه‌گذر                          | D    | C    | B    | A   |
| ۹۴ خرداد          | ۳۵۰                              | ۵۵۰  | ۵۱۶  | ۵۰۷  | ۴۱۱ |
| ۹۴ تیر            | ۳۴۵                              | ۵۴۰  | ۵۱۰  | ۴۹۰  | ۳۸۰ |
| ۹۴ مرداد          | ۳۴۵                              | ۵۴۲  | ۵۱۱  | ۴۹۵  | ۳۸۰ |
| ۹۴ شهریور         | ۳۱۰                              | ۵۰۰  | ۴۷۵  | ۴۵۵  | ۳۵۴ |
| ۹۴ مهر            | ۳۰۵                              | ۴۹۴  | ۴۷۹  | ۴۶۰  | ۳۵۰ |
| ۹۴ آبان           | ۹۰۰                              | ۱۱۰۰ | ۱۰۸۰ | ۱۰۵۹ | ۹۵۰ |
| ۹۴ آذر            | ۷۵۰                              | ۹۴۵  | ۹۲۰  | ۸۹۸  | ۷۸۰ |
| ۹۴ دی             | ۷۴۰                              | ۹۴۲  | ۹۱۲  | ۸۹۰  | ۷۷۵ |
| ۹۴ بهمن           | ۷۴۰                              | ۹۴۰  | ۹۱۰  | ۸۹۱  | ۷۷۴ |
| ۹۴ اسفند          | ۷۵۰                              | ۹۶۰  | ۹۳۲  | ۹۰۵  | ۷۸۲ |
| ۹۵ فروردین        | ۸۶۰                              | ۱۰۴۰ | ۱۰۱۵ | ۱۰۰۸ | ۸۹۵ |
| ۹۵ اردیبهشت       | ۷۴۰                              | ۹۴۰  | ۹۰۵  | ۸۹۰  | ۷۸۱ |



آب ورودی به تونل، ضرایب فرود و تعیین سهم انواع تخلخل در تخلیه آب در سیستم پرداخته شده است. مناسبترین زمان برای تجزیه و تحلیل منحنی فرود گستره هیدروگراف آب خروجی تونل، پس از باران‌های بهاری که ورودی سطحی به سیستم در عمل صفر است. در حقیقت در این زمان آبخوان در مرحله تخلیه مداوم است و این تخلیه به وسیله آبدهی تعیین شده است. برای برآورد و تحلیل میزان ضریب فرود از دو روش خط برازش منحنی فرود چشمه‌ها به صورت توانی از عدد نپرین (e) در نمودار فرود و فرمول تجربی مایلت (Maillet, 1905) استفاده شده است. بر اساس مبانی نظری و معادله‌ای که مایلت برای منحنی پسروری در یک دوره خشک به کار گرفت، می‌توان به اطلاعات و داده‌های کمی مربوط به توانایی تخلیه آبخوان گستره دست یافت. معادله‌ای که به بررسی ضریب تخلیه  $\alpha$  می‌پردازد، از طریق زاویه تانژانت بین خط مستقیم و محور افقی بیان می‌شود. ضریب تخلیه نتیجه ویژگی‌های هیدروژئولوژیک گستره کارستی (فضاهای خالی مؤثر و قابلیت انتقال آبخوان) و شاخص توانایی تخلیه آبخوان است. طبق رابطه ۱ می‌توان ضریب تخلیه را محاسبه کرد:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه،  $Q_t$  دبی در زمان  $t$  بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $Q_0$  دبی در زمان  $t_0$  بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $\alpha$  ضریب تخلیه تونل و  $t$  زمان بر حسب روز است.

نمودار شکل ۷ تغییرات دبی تونل نوسود و تراز سطح آب گمانه در دره زیمکان در سال آبی ۱۳۹۴ را نشان می‌دهد.

نمودار مربوط به منحنی فرود دبی تونل به گونه‌ای که محور افقی آن زمان بر حسب روز و محور عمودی دبی تونل بر حسب مترمکعب بر ثانیه با مقیاس نیمه لگاریتمی است. با تحلیل نمودار فروکش آبدهی تونل در طول دوره خشک، سه ضریب تخلیه را می‌توان مشخص کرد. به عبارتی هر یک از این ضریب‌ها، نمایانگر یک رژیم تخلیه می‌باشند. حجم ذخیره دینامیکی نیز به عنوان عاملی که نتیجه شرایط خاص زمین‌شناسی و بازخوردی از توسعه کارستی یک گستره است، از طریق رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$V = 86400 (Q_{01}/\alpha_1 + Q_{02}/\alpha_2 + Q_{03}/\alpha_3) \quad \text{رابطه ۲}$$

انتقال کانال‌های آب، مرز زمین‌های کشاورزی، ستیج ارتفاعات و غیره را به صورت خطواره نشان داده است. در صورت استفاده از این خطواره‌های غیرواقعی، خطا اتفاق می‌افتد. بنابراین، این خطواره‌های غیرواقعی باید حذف شوند. برای حذف خطواره‌های غیرواقعی، خطواره‌های استخراج شده از این دو نرم‌افزار را به نرم‌افزار Google Earth برده و خطواره‌های مشکوک که در بالا اشاره شد، حذف شدند. شکل ۱۰ خطواره‌های تصحیح شده را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن خطواره‌های گستره مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Bing در افزونه Arc-brutite، در محیط نرم‌افزار GIS اقدام صورت گرفت و در نهایت با تطابق خطواره‌های استخراج شده از این سه نرم‌افزار نقشه خطواره‌ها و تقاطع خطواره‌ها تهیه شد (شکل ۱۰).

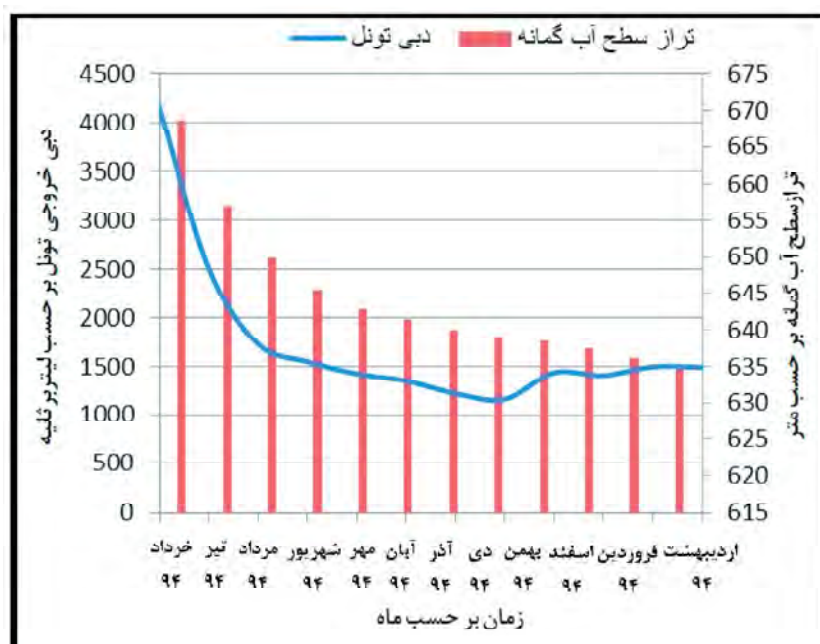
سپس از روی خطواره‌ها استخراج شده در محیط نرم‌افزار GIS، نقشه تقاطع خطواره‌ها گستره به دست آمد. با استفاده از تابع density از ابزار spatial analyst tools در نرم‌افزار GIS نقشه چگالی خطواره‌های گستره تهیه شد. به منظور تعیین روند شکستگی‌های گستره و نمایش گرافیکی آن از نمودار گل سرخی استفاده شده است. نمودار گل سرخی شکستگی‌های گستره، بر اساس شکستگی‌های استخراج شده رسم شده است. جهت یافتن روند کلی شکستگی‌های گستره، با استفاده از نرم‌افزار lineament statistics در محیط GIS مجموع فراوانی محاسبه شده است.

## جریان ورودی به تونل در محل مغار

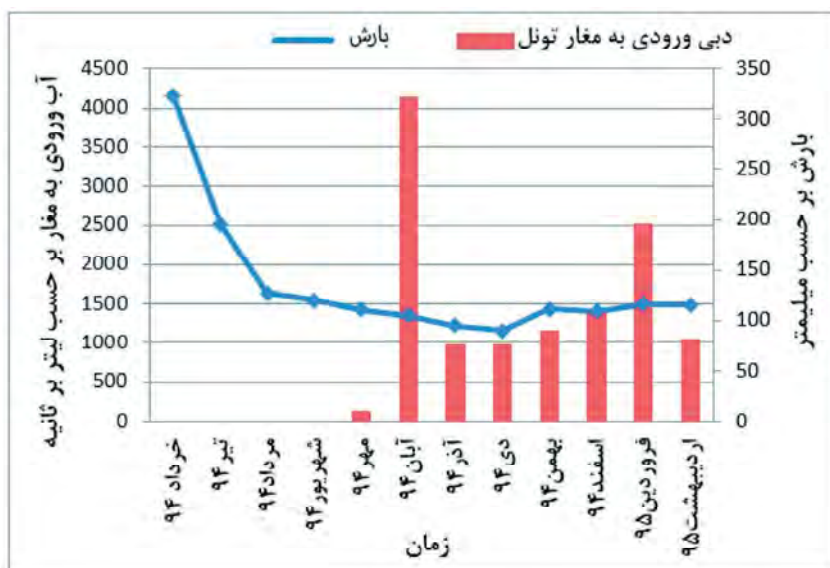
بررسی و تحلیل هیدروگراف چشمه‌ها روشی برای ارزیابی سیستم جریان و میزان کارستی بودن مخزن آن می‌باشد. تخلیه سیستم‌های کارستی بیشتر در تراز سطح اساس هیدروژئولوژیک از طریق چشمه‌ها صورت می‌گیرد. در حقیقت ضریب فرود نشان‌دهنده میزان کارست شدگی در آبخوان آهکی است. در این پژوهش برای تحلیل سیستم کارست از آمار دبی روزانه آب ورودی به تونل نوسود (به عنوان تخلیه کننده سیستم کارستی) و داده‌های روزانه سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در دره زیمکان استفاده شده است. با تحلیل هیدروگراف آب خروجی از تونل نوسود به محاسبه و تحلیل پارامترهایی همچون، حجم ذخیره دینامیکی، زمان مرگ

است. دلیل آن می‌تواند تأثیر بارش‌های رخ داده در زمستان و بهار باشد. تحلیل هیدروگراف آب ورودی به تونل و مقایسه آن با میزان بارش‌های صورت گرفته بر روی گستره نشان می‌دهد، بین بارش و افزایش آب ورودی به تونل رابطه‌ای وجود دارد و تأثیر بارش‌ها چند روز بعد از پیک بارش بر روی آب ورودی به تونل نمایان می‌شود. شکل ۸ رابطه بارش گستره با افزایش آب ورودی به تونل را نشان می‌دهد.

در این رابطه  $V$  حجم ذخیره دینامیکی مخزن،  $Q_{01}$ ،  $Q_{02}$ ،  $Q_{03}$  دبی و  $\alpha_{01}$ ،  $\alpha_{02}$ ،  $\alpha_{03}$  ضریب تخلیه می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، دبی تونل بعد از برخورد به حفره کارستی در هنگام حفاری (خرداد ۹۴) که طبق گزارش موسسه ایمن‌سازان نزدیک به ۴۷۰۰ لیتر بر ثانیه است، به ۱۱۳۵ لیتر بر ثانیه در دی ۹۴ کاهش یافته است و از دی ماه ۹۴ تا اردیبهشت ۹۵ دبی آب ورودی به تونل روند صعودی داشته و به حدود ۱۵۵۰ لیتر بر ثانیه افزایش یافته



شکل ۷. نمودار تغییرات دبی تونل نوسود و تراز سطح آب گمانه در دره زیمکان

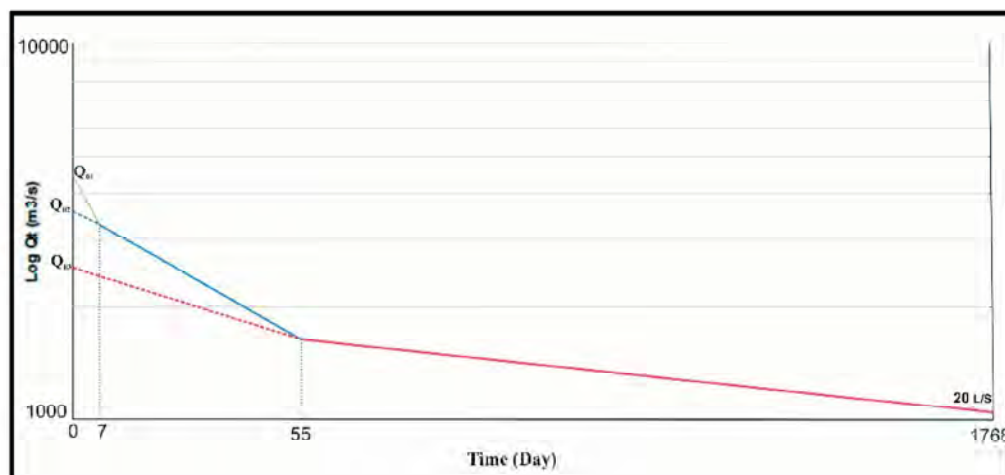


شکل ۸. نمودار آب ورودی به تونل و ارتباط آن با بارش

## بحث

دست داد و جریان آب تخلیه‌ای از درز و شکاف‌های باریک‌تر بوده است ( $\alpha_2$ )، در ادامه آب از منافذ درز و شکاف‌های بسیار باریک ( $\alpha_3$ ) (تحت سیستم جریان افشان) تخلیه شده است. هر چه ضریب تخلیه بزرگ‌تر باشد، دبی تخلیه از تونل به همان نسبت بیشتر صورت می‌گیرد. مهم‌ترین نکته در تفسیر ویژگی‌های هیدروژئولوژی حوضه آبریز یک چشمه، توجه به ضریب  $\alpha$  در فرود انتهایی چشمه است، چرا که ضریب تخلیه پایانی مؤید خصوصیات عمیق‌ترین بخش آبخوان است و جریان پایه را از طریق تونل تخلیه می‌کند. در رژیم  $\alpha_3$  در مدت زمان ۸۷ روز دبی خروجی تونل از ۱۷۳۰ به ۱۳۷۹ لیتر در ثانیه کاهش یافته است.

بر اساس تحلیل منحنی فرود تونل نوسود (شکل ۹) مقدار ضریب‌های تخلیه طبق رابطه ۱ محاسبه شد. بر این اساس  $\alpha_1$ ،  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  به ترتیب ۰/۰۴۰۶۳، ۰/۰۱۴۴۸ و ۰/۰۰۲۶ در زمان‌های به ترتیب هفت، ۴۸ و ۸۷ روز به دست آمد. تجزیه و تحلیل ضریب تغییرات با توجه به کاهش ضریب تخلیه ( $\alpha$ ) با گذشت زمان، نشان می‌دهد، سیستم جریان غالب منطقه، شکستگی-افشان است و نشان‌دهنده توسعه کارست شدگی متوسط در منطقه است. مقدار ضریب‌های تخلیه نشان می‌دهد، در ابتدا، تخلیه جریان آب متأثر از کانال‌ها و مجاری بزرگ در سیستم کارست بوده است ( $\alpha_1$ ) و پس از هفت روز جریان آب از مجاری بزرگ اهمیت خود را از



شکل ۹. منحنی فرود دبی تونل نوسود

اساس محاسبات روش مایلت، انتظار می‌رود این حجم ذخیره (۴۵ میلیون متر مکعب) در صورت نبود بارندگی با توجه به رابطه ۳، در مدت ۱۶۲۸ روز معادل (۴/۵ سال) از آغاز دوره خشک از تونل خارج شود و سپس تونل خشک شود. البته این زمان همان‌طور که اشاره شد بدون در نظر گرفته احتمال برخورد به مجاری و شکستگی آبدار پیش رو در طی حفاری آبی تونل و با در نظر گرفته ثبات شرایط فعلی و بدون تغذیه سالانه محاسبه شده است.

تعداد خطواره‌های گستره مورد مطالعه ۲۹۹۱ می‌باشد و حداقل طول ۴۶ متر و حداکثر طول ۱۵۱۶۲ متر است (شکل ۱۰).

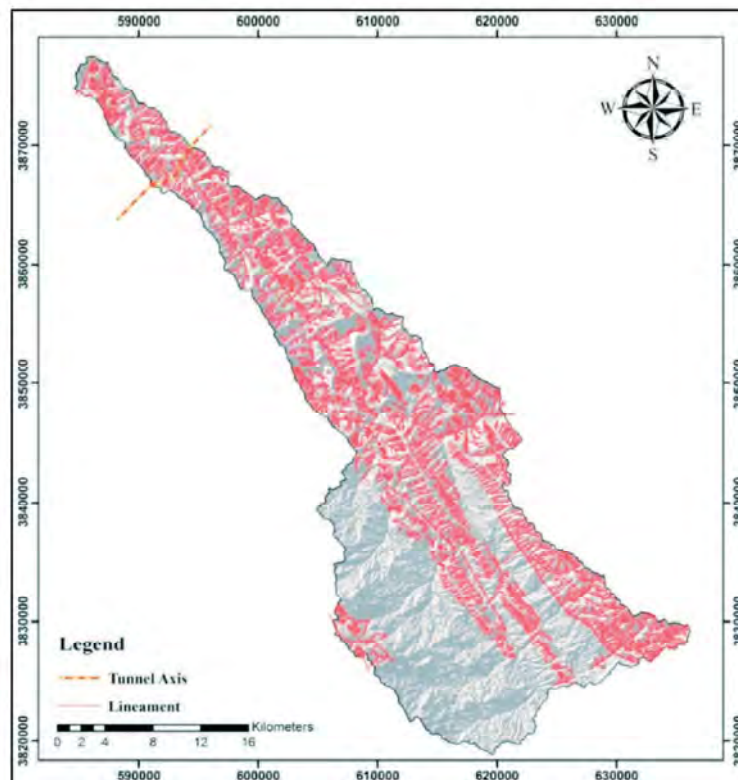
محاسبات بر اساس روش مایلت نشان می‌دهد، حجم ذخیره دینامیک آبخوان کارستی سورمه در تراز بالاتر از محور تونل حدود ۴۵ میلیون متر مکعب است. با توجه به رفتار تخلیه تونل که شبیه رفتار چشمه‌های کارستی است می‌توان با داشتن ضرایب تخلیه، زمان خشک شدن تونل را در صورت ادامه دوره خشک (بدون بارش) بر اساس رابطه ۳ محاسبه کرد:

$$t_0 = \frac{t \times \log e}{\log \frac{Q_0}{Q}} \quad \text{رابطه ۳}$$

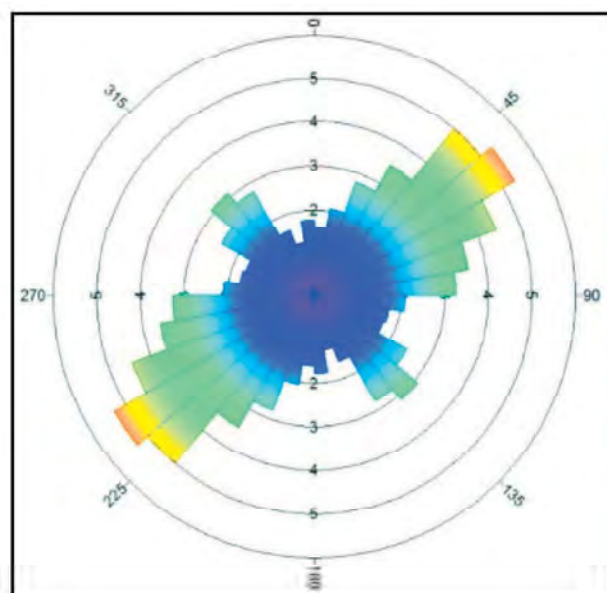
در این رابطه  $t_0$  مدت زمان تخلیه چشمه با دبی  $Q_0$  (ضریب خشکیدگی) و  $\log e$  برابر ۰/۴۳۴۳ می‌باشد. بر



با توجه به نمودار گل سرخی شکستگی‌های گستره (شکل ۱۱) روند شکستگی‌های گستره در جهت‌های شمال شرق و جنوب غرب می‌باشد (عمود بر روند چین خوردگی‌های گستره) و بیشترین فراوانی شکستگی‌های گستره در محدوده آزیموتی ۳۰ تا ۶۰ درجه قرار دارد. با توجه به روند محوری چین خوردگی گستره، بیشتر این شکستگی‌ها از نوع عرضی است و نقش اصلی در انتقال آب (نفوذ) به تونل را دارند. شکستگی‌های طولی در روند محور چین خوردگی قرار دارند. روند خطواره‌های استخراج شده گستره نشان می‌دهد، خطواره‌های استخراج شده به احتمال زیاد جنبه ساختاری دارند.



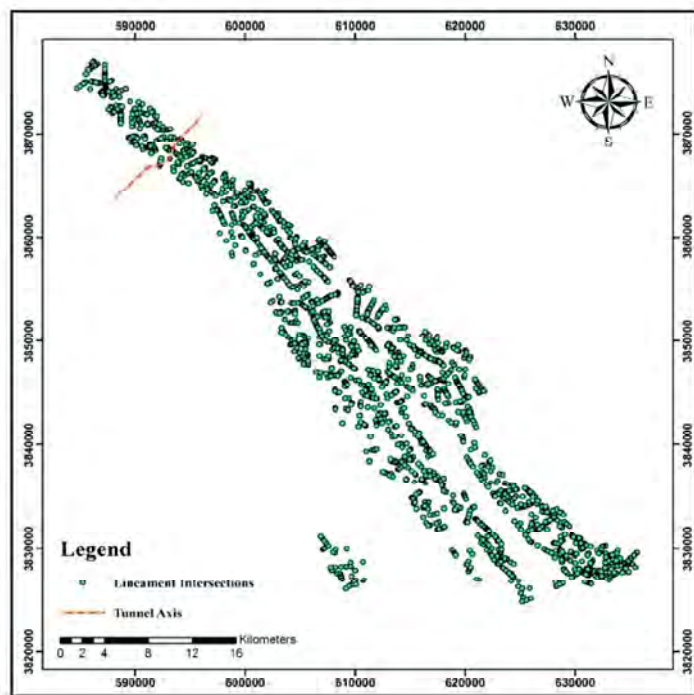
شکل ۱۰. خطواره‌های حوضه آبریز رودخانه زیمکان



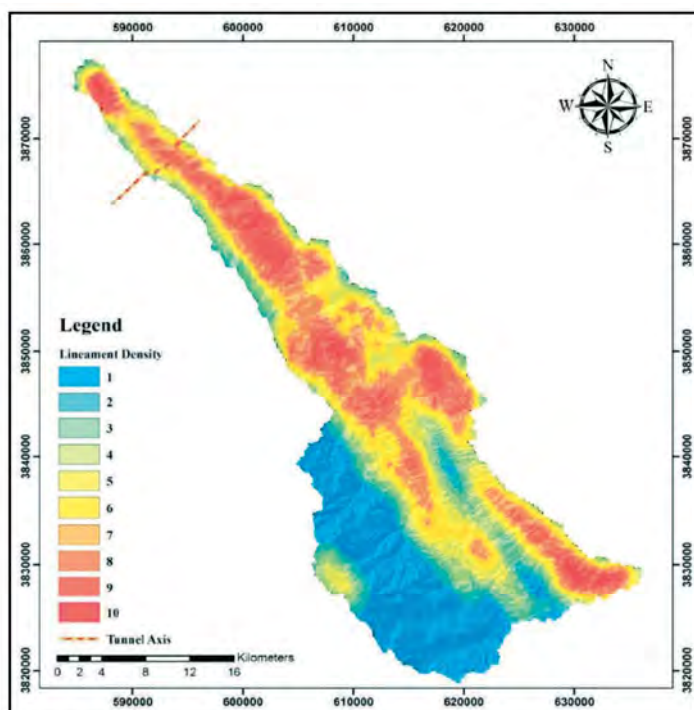
شکل ۱۱. نمودار گل سرخی شکستگی‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای حوضه آبریز رودخانه زیمکان

تقاطع شکستگی‌های حوضه آبریز رودخانه زیمکان در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نقشه چگالی خطواره‌ها بر حسب درصد به ۱۰ رده تقسیم‌بندی شد و با توجه به اینکه چگالی خطواره بیشتر نفوذ بیشتر و به تبع تغذیه بیشتر می‌باشد به چگالی‌های بیشتر ارزش بیشتر داده شد

(مناطق دارای ارزش ۱۰ حداکثر چگالی درزه و مناطق دارای ارزش یک حداقل چگالی درزه را دارا می‌باشند). نقشه چگالی خطواره‌ها حوضه آبریز رودخانه زیمکان در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. تقاطع شکستگی‌های حوضه آبریز رودخانه زیمکان

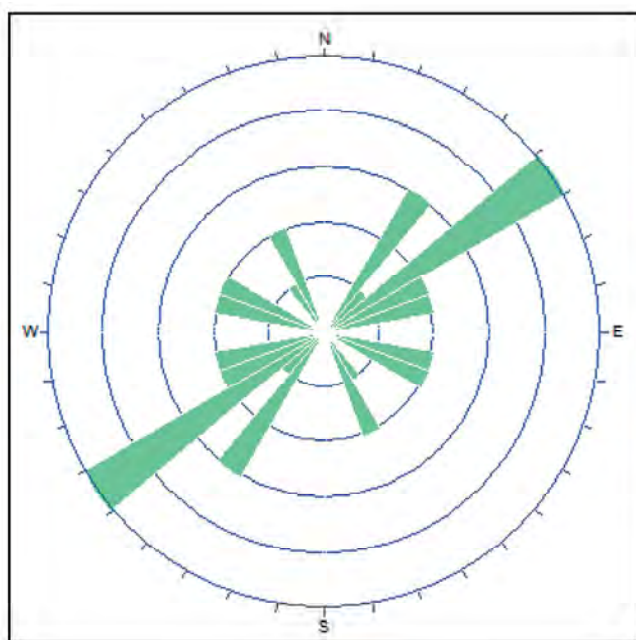


شکل ۱۳. طبقه‌بندی چگالی خطواره‌های حوضه آبریز رودخانه زیمکان

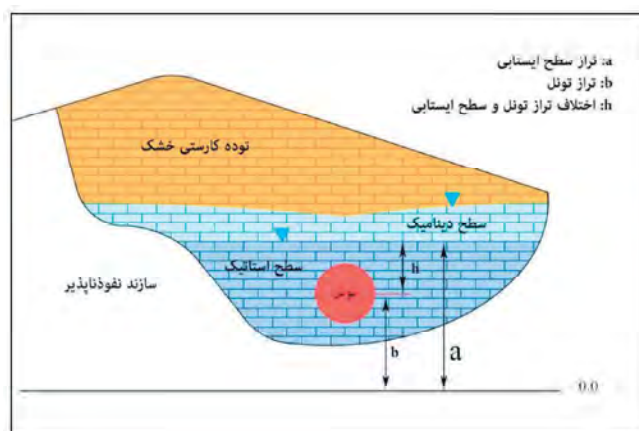
### برداشتهای صحرایی ناپیوستگی‌ها

باعث می‌شود، ضخامت پهنه خرد شده آنها چندان زیاد نباشد. پهنه خرد شده CZ1 دارای پهنای تقریبی ۲۵ الی ۳۰ متر است. در مترژهای تقریبی ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ متر از انتهای تونل پهنه خرد شده دیگری که در اثر فعالیت گسل معکوسی در همین بخش ایجاد شده است، تشخیص داده شد. پهنای این پهنه خرد شده با توجه به ساختارهای خرد شده موجود در گستره آن در حدود ۱۰۰ متر برآورد می‌شود. خرد شدگی سنگ‌ها در این پهنه‌ها می‌تواند ضمن زهکش کردن آب‌های زیرزمینی به سمت تونل، ریزش‌هایی را در تونل باعث شود. مدل مفهومی آبخوان کارستی مورد مطالعه در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

در گستره مطالعاتی تاقدیس زیمکان، دسته درزه‌هایی با جهت شیب ۳۰۰ تا ۳۰۵، ۱۵۰ تا ۱۶۰، ۸۰ تا ۹۰ و ۳۲۰ تا ۳۳۰ دارای بیشترین فراوانی می‌باشند (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۵). نمودار گل سرخی این درزه‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. جهت ناپیوستگی‌ها (لایه‌بندی، شیب‌توزیته) به‌عنوان یک عامل مهم در شروع و توسعه جابجایی‌ها در اطراف تونل عمل می‌کنند. همچنین در مسیر تونل چند گسل که پهنه‌های خرد شده‌ای را در اطراف خود ایجاد کرده‌اند، شناسایی شد. با وجود ساز و کار فشاری گسل‌های مورد بحث، لیتولوژی سنگ‌های در برگیرنده



شکل ۱۴. نمودار گل سرخی شکستگی‌های برداشت شده حوضه آبریز رودخانه زیمکان



شکل ۱۵. مدل مفهومی از آبخوان کارستی



## نتیجه‌گیری

- شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۸۸. نقشه زمین‌شناسی باینگان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.
- مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۹۴-الف. گزارش هیدروژئولوژی تونل قطعه دوم تونل نوسود.
- مهندسین مشاور ایمن‌سازان، ۱۳۹۴-ب. گزارش زمین‌شناسی تکمیلی، هیدروکلیماتولوژی، هیدروژئولوژی، آماربرداری ادواری گمانه‌ها و منابع آب زیرزمینی مسیر تونل انتقال آب نوسود.
- مهندسین مشاور پارس کانه کیش، ۱۳۸۵. مطالعات هیدروژئولوژیکی بخش دوم تونل زاگرس.
- مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۵. گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر قطعه دوم تونل نوسود.
- مهندسین مشاور لار، ۱۳۸۳. مطالعات مرحله یک تونل انتقال آب نوسود.
- ناصری، ح.ر.، بیات، ن.، ایزدی کیان، ل.، و علیجانی، ف.، ۱۳۹۷. نقش ساختارهای تکتونیکی در هدایت آب‌های زیرزمینی به قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس-استان کرمانشاه. فصل‌نامه زمین‌شناسی ایران، ۱۱، ۴۵.
- Atkinson, T.C., 1977. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *Journal of Hydrology*, 35, 93-10
- Bonacci, O., 1993. Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. *Journal of Hydrological Sciences*, 38, 51-62. <https://doi.org/10.1080/02626669309492639>
- Fernandez, G. and Moon, J., 2010. Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel-part 1: Guideline for estimate of groundwater inflow rate. *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 25, 560-566. DOI: 10.1016/j.tust.2010.04.001.
- Foladgar, A., 2003. Introduction of Kuhrang tunnel project and excavation methods. In: 6th Iranian Tunneling Conference, Tehran, Iranb.
- Komac, B., 2006. The Karst Springes of Kanin Massif Kra Ki Izvir Pod Kanin Skim Pograje. <http://www.zrc-sazu.si/giam/zbornik/komac41>

تخمین دبی ورودی به تونل در گستره کارستی دره زیمکان مسئله‌ای پیچیده است و متغیرهای مختلفی بر آن تأثیر گذاشته است. رودخانه زیمکان و ساختارهای پیچیده تکتونیکی منطقه از یک سو و کارستی بودن گستره از سوی دیگر باعث هجوم جریان آب به داخل تونل شده است. بر اساس تجزیه و تحلیل منحنی فرود دبی تونل و همچنین ضرایب تخلیه به دست آمده چنین استنباط می‌شود، تونل نوسود در گستره دره زیمکان از یک توده آهکی با تکامل درجه متوسط کارستی تغذیه می‌شود و نبود توسعه کامل کارست در توده آهکی باعث تأخیر در پایان هجوم آب ورودی به تونل شده است. نتایج نشان می‌دهد سه رژیم کارستی تیبیک در کارست دره زیمکان در گستره تونل نوسود وجود دارد. سه رژیم تخلیه برای آبخوان کارستی بیان شده با ضرایب  $0.0463$ ،  $0.01448$  و  $0.026$  منطبق با سه نوع سیستم جریان مجرایی، شکستگی و زمینه‌ای مشخص شده است. با بررسی منحنی فرود دبی تونل، حجم ذخیره دینامیک این آبخوان برابر ۴۵ میلیون متر مکعب و زمان مرگ آب ورودی به تونل از طریق سیستم کارستی ۱۶۲۸ روز (معادل ۴/۵ سال) محاسبه شد. البته این زمان بدون در نظر گرفتن احتمال برخورد به مجاری و شکستگی آبدار پیش رو در طی حفاری تونل و با در نظر گرفتن ثبات شرایط فعلی و بدون تغذیه سالانه محاسبه شده است. نمودار گل سرخی درزه‌های برداشت شده صحرایی و درزه‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای دارای جهت یکسانی هستند، بنابراین در مقدار دبی ورودی به تونل مؤثر می‌باشند.

## منابع

- آقاناتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۶۴۰.
- بیات، ن.، ۱۳۹۴. ارزیابی توانایی روش‌های تجربی، تحلیلی و بیلان در برآورد آب ورودی به قطعه دوم تونل زاگرس-کرمانشاه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. ۱۵۵.
- سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۸۶. نقشه زمین‌شناسی غرب پاوه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.

- Korkmaz, N., 1990. The Estimation of groundwater recharge from spring hydrographs. *Journal of Hydrological Sciences*, 35, 209-217.
- Li, D., Li, X., Li, Ch., Huang, B., Gong, F. and Zhang, W., 2009. Case studies of groundwater flow into tunnels and an innovative water-gathering system for water drainage. *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 260-268.
- Li, X. and Li, Y., 2014. Research on risk assessment system for water inrush in the karst tunnel construction based on GIS: Case study on the diversion tunnel groups of the Jinping II Hydropower Station. *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 182-191.
- Maillet A., 1905. *Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale*. Herman, Paris, France.
- Mudry, J., 1997. Role of karstification and rainfall in the behavior of a heterogeneous karst system", *Journal of Environmental Geology*, 114-123.
- Ramsay J. and Huber, M., 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology*, 2; Folds and Fractures, Ramsay, Academic Press; 1 edition.
- Shahriar, K., Sharifzadeh, M. and Khadem, H.J., 2008. Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 23, 318-325.
- Zarei, H.R., Uromeihy, A. and Sharifzadeh, M., 2012. Identifying geological hazards related to tunneling in carbonate karstic rocks-Zagros, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 5, pp 457-464. DOI 10.1007/s12517-010-0218-y.
- 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.
- Zhang, J. and Chen, G., 1988. Some new ideas on the prediction of tunnel inflow in Karst area by water balance method. In: *IAH 21th Congress on Karst Hydrogeology and Karst Environment Protection*, 10-15 October, China.