

# بررسی نقش ساختارهای زمین‌ساختی و چینه‌شناسی در پیش‌بینی هجوم آب به درون تونل با استفاده از روش سنجش از دور (مطالعه موردی: تونل انتقال آب نوسود، قطعه ۱-الف)

مجتبی حیدری<sup>۱\*</sup> و مسعود شرفی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران  
<sup>۲</sup>کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۵

## چکیده

در مطالعات زمین‌شناسی حفاری تونل، استفاده از سنجش از دور ماهواره‌ای در کنار پیمایش زمینی روشی مؤثر در ارزیابی خطرات تونل‌سازی به شمار می‌آید. در این مطالعه، مسأله برخورد با مناطق مستعد هجوم آب زیرزمینی در قطعه ۱-الف تونل انتقال آب نوسود در منطقه مرزی شمال باختر کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب سنگی منطقه از جنس سنگ‌آهک و شیل است که موجب ایجاد توالی لایه‌های سخت و نرم در ساختگاه تونل شده است. لایه‌های سنگ‌آهک درزه‌دار و حفره‌دار در تناوب با لایه‌های شیل نفوذناپذیر مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده در هجوم آب به درون تونل نوسود هستند. به دلیل خطر انفجار مین در منطقه، پیمایش زمینی همه مسیر تونل را شامل نمی‌شود. همچنین به منظور شناسایی لایه‌های دارای پتانسیل هجوم آب، شواهد آب‌زمین‌ساختی و آب‌شناختی در منطقه با استفاده از تصاویر استر بررسی شد. این پژوهش نشان می‌دهد که تونل در برخورد با واحدهای Li<sub>3</sub> و Li-Sh<sub>3</sub> با خطر بالای هجوم آب روبه‌رو است. مشاهدات حفاری تونل نیز نشان می‌دهد که عبور تونل از لایه‌های سخت و برخورد با شکستگی‌های باز، عامل اصلی هجوم آب به درون تونل است که با نتایج حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای انطباق مناسبی دارد.

**کلیدواژه‌ها:** ساختارهای زمین‌ساختی، چینه‌شناسی، سنجش از دور، هجوم آب، تونل.

**نویسنده مسئول:** مجتبی حیدری

E-mail: heidarim\_enggeol@yahoo.com

## ۱- پیش‌نوشتار

به منظور شناسایی و برآورد هجوم آب به درون تونل روش‌های عددی و تحلیلی بسیاری توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است (Goodman et al., 1965; Lei, 1999; Karlsrud, 2001; El Tani, 2003). از آنجا که این روش‌ها پایه تئوری دارند؛ نتایج به‌دست آمده از آنها نزدیک به هم است و در بیشتر روش‌ها از متغیری به نام هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شود که این ضریب به هندسه سامانه منافذ بستگی دارد. در عملیات تونل‌سازی با وجود برخورد با جریان‌های محلی آب زیرزمینی در شرایط ناهمگون و پیچیده زمین‌شناسی که توسط مشخصه‌های مانند تناوب لایه‌ها، چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی ایجاد می‌شود؛ نمی‌توان تنها به نتایج محاسباتی بسنده کرد. در سال‌های اخیر استفاده از روش سنجش از دور به منظور شناسایی منابع آب زیرزمینی به‌طور گسترده رواج یافته است. این مطالعات مربوط به ارزیابی سطحی زمین در مقیاس منطقه‌ای است و شواهد سطحی آب‌های زیرزمینی از راه تصاویر ماهواره‌ای در مقیاس محلی کمتر بررسی شده است. از کاربردهای معمول تصویر ماهواره‌ای می‌توان به تهیه نقشه چینه‌شناسی (Bedini, 2009) تشخیص و شناسایی گسل‌ها (Philip, 2007; Gloaguen et al., 2007) و نقشه‌برداری سیمای خطی در سرزمین‌های رسوبی (Kresic, 1994; Kaya et al., 2004) اشاره کرد. در برخی موارد سیمای خطی ممکن است گسل‌هایی با جابه‌جایی قائم را نشان دهند که آبخوان را در برابر یک مانع ناتراوا قرار می‌دهد. در چنین حالتی، سیمای خطی می‌تواند سدی در برابر جریان آب زیرزمینی تلقی شود (Vincent, 1997). در سال‌های اخیر به منظور ارزیابی هندسی شکستگی‌ها و گسل‌ها در طراحی و حفر تونل‌ها، استفاده از روش‌های نرم‌افزاری گسترش فراوانی یافته است (Choi, 2009). مطالعه ارتباط شکستگی‌ها نقش مهمی در تحلیل و ارزیابی پایداری تونل دارد. می‌توان با روش‌های پیمایشی و نیز مطالعه مورفولوژی سطحی زمین از راه داده‌های ماهواره‌ای به ارتباط هندسی شکستگی‌ها و گسل‌ها دسترسی یافت. این اطلاعات را می‌توان در یک چارچوب سه‌بعدی نرم‌افزاری مانند Arc GIS رسم کرد (Choi, 2009). داشتن درک درستی از هندسه فضایی شکستگی‌ها، به پیش‌بینی درستی از رخداد خطرات حفاری تونل می‌انجامد.

مطالعه شاخص‌های فیزیوگرافیک سطحی زمین شامل وضعیت توپوگرافی،

ژئومورفولوژی، شبکه زهکشی، پوشش گیاهی، پراکنش چشمه‌ها است. شناخت این عوامل سطح‌الارضی و تعیین ارتباط آنها با نوع ساختارهای زمین‌ساختی همچون گسل‌ها و شکستگی‌ها نقش مؤثری در شناسایی آبخوان‌های شکافی زیرزمینی بازی می‌کند.

تونل نوسود قطعه ۱-الف در پهنه زاگرس و زیرپهنه زاگرس چین‌خورده-رانده قرار دارد. این تونل با طول ۱۴ کیلومتر و قطر ۵/۲ متر در راستای NE-NW عمود بر امتداد ساختارهای محلی زاگرس حفاری می‌شود. این ساختارها شامل یک تاقدیس است که امتداد آن عمود بر امتداد مسیر تونل است. منطقه مورد مطالعه شامل سه زیر حوضه است که به ترتیب از جنوب باختر به سوی شمال خاور تونل عبارتند از: هیرتا، زی و بله‌بران. این تونل با هدف انتقال آب رودخانه مرزی سیروان به درون مناطق گرمسیری دشت ذهاب طراحی شده است. در این مطالعه سعی شده است با استفاده از مطالعه مورفولوژیکی و زمین‌ساختی به روش سنجش از دور ماهواره‌ای و مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، محل هجوم آب به درون تونل پیش‌بینی شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱. سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

واحدهای سنگی منطقه را به سن ژوراسیک (سازند سورمه از گروه خامی) نسبت می‌دهند. هر چند واحدهای سنگی کرتاسه معادل سنی گروه بنگستان (شامل سازندهای ایلام و گرو) نیز گسترش دارند (Alavi, 1994). تر کب سنگی این سازندها از نوع سنگ‌آهک، آهک آرژیلیتی و شیل است. ستبرای لایه‌ها بر پایه روش پیشنهادی Bureau of Reclamation (1997) میان ۳ تا ۳۰۰ سانتی‌متر (دارای لایه‌بندی) و بیش از ۳۰۰ سانتی‌متر (توده‌ای) تعیین شده است (شکل ۱). واحدهای زمین‌شناسی مهندسی منطقه از دید ساختاری به چهار گروه تقسیم می‌شوند که شامل لایه‌های آهکی Li<sub>1</sub>، آهکی-شیلی Li-Sh، پهنه شکسته و پهنه خرد شده است. پایه این رده‌بندی ویژگی‌های سنگ‌شناختی، مورفولوژیکی و ساختاری لایه‌های رسوبی منطقه است. وجود شکستگی‌های باز عمودی از ویژگی‌های ساختاری واحدهای آهکی Li<sub>1</sub> صخره‌ای است. وجود درزه‌های غیر سامان‌مند در پهنه خرد شده مبنای

خود نشان می‌دهند. از میان دو سنگ با شکنندگی یکسان، آن که مقاوم‌تر است؛ تعداد شکستگی‌هایش بیشتر خواهد بود. رابطه میان مقاومت سنگ و فاصله‌بندی شکستگی‌ها، در پژوهش‌های انجام شده توسط Hugman and Friedman (1979) و Sinclair (1980) بحث شده است. آنها با مطالعه رخنمون سنگ‌های کربناته در مونتانا، رابطه رودرروی تعداد شکستگی‌ها و ویژگی‌های مقاومتی سنگ را مطالعه کردند. نتایج مطالعات این پژوهشگران نشان داد که واحدهای سنگی مقاوم‌تر و شکننده‌تر، بیشترین شکستگی را دارند. شکنندگی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل نوسود با استفاده از فرمول شاخص شکنندگی (Brittleness Index) به دست آمده است (رابطه ۲). از دید مورفولوژی واحدهای صخره‌ای شکستگی‌های فراوانی دارند که نتیجه مقاومت بالاتر و شاخص شکنندگی بالای این واحدها در برابر فشار زمین‌ساختی است. این اطلاعات در راستی‌آزمایی واحدهای یادشده از دید نقشه تراکم خطواره‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

$$B_3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2} \quad (2)$$

در این رابطه،  $\sigma_c$  مقاومت تراکمی سنگ و  $\sigma_t$  مقاومت کششی آن بر حسب مگاپاسکال هستند. نتایج این محاسبات به ترتیب واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در جدول ۱ ارائه شده است. آزمایش‌ها مطابق با استانداردهای ISRM (1978) بر روی نمونه‌های آهکی و شیلی منطقه صورت گرفته است. بیشترین مقاومت تراکمی مربوط به واحد Li3 برابر با ۲۵۰ مگاپاسکال است.

#### ۵- نتایج و بحث

ساختارهای زمین‌شناسی عامل مهم کنترل‌کننده جریان آب به درون تونل نوسود هستند. تاقدیس زی بر اثر فشار زمین‌ساختی و فرسایش سبب شکل‌گیری دره‌زی شده که در برگیرنده پهنه‌های شکسته و خرد شده در قالب شکل‌های کواستاست (شکل ۵). در منطقه مطالعاتی این پدیده گسترشی فراوان و منظره پلکانی دارد. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر توالی لایه‌های سخت آهکی و نرم شیلی و چین‌خوردگی و شکستگی در ژئومورفولوژی منطقه است. با استفاده از نقشه شیب منطقه و همچنین باند ۳ سنجنده استر نقشه وضعیت این ویژگی ساختاری در منطقه مشخص شد (شکل ۶). واحدهای سبتر لایه آهکی در منطقه بخش سخت و پرتگاهی کواستا و واحدهای نرم و نازک لایه آهکی - شیلی بخش فرورفتگی یا همان پای پرتگاه را شکل می‌دهند؛ این اشکال ناشی از فرسایش تاقدیس‌های منطقه هستند. واحدهای آهکی صخره‌ساز Li3 در منطقه مورد مطالعه دارای مقاومت و شاخص شکنندگی بیشتری نسبت به دیگر واحدها هستند. این واحدها در نتیجه تنش‌های زمین‌ساختی حاکم در منطقه، شکستگی‌های باز و منظمی دارند. این شکستگی‌ها بیشتر عمودی هستند و سبب انقطاع در لبه کواستا و در نتیجه فرسایش تدریجی تاقدیس‌ها شده‌اند. دومین ویژگی ساختاری کنترل‌کننده آب زیرزمینی در منطقه گسل‌ها هستند. گسل‌های پهنه شکسته به دلیل اثر جابه‌جایی بر واحدهای سبتر لایه با آثار شکستگی در سطح زمین همراه هستند. به منظور مطالعه این آثار جابه‌جایی مدل سایه ارتفاعی منطقه با آزیموت تابش نور ۴۵ و زاویه تابش ۳۰ درجه از سطح افق از منطقه رسم شد. آثار جابه‌جایی در واحدهای صخره‌ساز منطقه به‌بازان در مدل به دست آمده دیده می‌شود (شکل ۷). جابه‌جایی این گسل‌ها سبب ایجاد شاخه‌های گسلی فرعی امتدادلغز گشته است.

به منظور تعیین نوع و راستای گسل‌های منطقه، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و روش استخراج اتوماتیک خطواره‌ها در نرم‌افزار ArcGIS نقشه خطواره‌های منطقه تهیه شد (شکل ۸). در این مطالعه باندهای ۱ تا ۴ و مدل ارتفاعی رقومی تصویر استر استفاده شد. ۸ مدل سایه رقومی برای استخراج خطواره‌ها با زاویه تابش ۳۰ درجه از سطح افق و آزیموت‌های ۱۰، ۴۵، ۹۰، ۱۳۰، ۱۸۰، ۲۷۰، ۲۴۰ و ۳۲۰ درجه به دست آمد. جهت‌گیری خطواره‌ها با امتداد گسل‌های منطقه انطباق مناسبی نشان می‌دهد (شکل ۸).

تفکیک این واحد از پهنه شکسته است. تاقدیس زی که یک تاقدیس برگشته (دره‌زی) است؛ پهنه‌های شکسته و خرد شده را دربر گرفته و به شکل‌گیری اشکال منظم صخره‌ای در منطقه انجامیده است (شکل ۱).

#### ۲- روش مطالعه

فلوچارت روش مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. در این روش، شناسایی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی که بیشترین پتانسیل هیدرولیکی را برای جریان آب زیرزمینی دارند بر پایه استفاده از نرم‌افزار ArcGIS برای تجزیه و تحلیل مکانی اطلاعات استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای استر و نقشه‌های زمین‌شناسی زمین مرجع (ژئورفرنس) شده انجام می‌شود. شکل ۳، تصویر رنگی استر از منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

اطلاعات مکانی استخراج شده از تصاویر استر شامل نقشه پوشش گیاهی، نقشه لبه‌ها و خطواره‌ها و نقشه هیدروگرافی است. در این مطالعه نقشه پوشش گیاهی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) مطابق رابطه ۱ تهیه می‌شود.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $\rho_{Red}$  و  $\rho_{NIR}$  به ترتیب مقادیر بازتابی پیکسل‌ها در باندهای سرخ (باند ۲ استر) و فرورسرخ نزدیک (باند ۳ استر) هستند. استخراج لبه‌ها و خطواره‌ها نیز به کمک تفسیر بصری و استفاده از الگوریتم‌های استخراج لبه قابل انجام است. در این مطالعه، برای استخراج خطواره‌ها از روش استخراج خودکار خطواره بر پایه روش STA (Segment Tracing Algorithm) (Koike et al., 1995) استفاده شد. اساس کار روش STA نمایان ساختن لبه‌ها در تصویر با توجه به تغییرات محلی در مقادیر خاکستری پیکسل‌های تصویر است. تهیه نقشه هیدروگرافی نیز با استفاده از مدل ارتفاعی حاصل از تصاویر پوششی استر انجام می‌شود. لازم به توضیح است یکی از ویژگی‌های آشکار سنجنده استر در باندهای مرئی و فرورسرخ نزدیک، قابلیت تهیه تصاویر پوششی (استریو) در امتداد مسیر حرکت ماهواره است. بر پایه این ویژگی می‌توان تصاویر استریوسکوپ (سه‌بعدی) را از مناطق مختلف زمینی تهیه کرد و از آنها برای انجام تحلیل‌های مختلف سه‌بعدی سطح بهره گرفت. اندازه پیکسل زمینی این سنجنده در باندهای مرئی و فرورسرخ نزدیک ۱۵ متر و پهنای نوار پوشش زمینی نیز ۶۰ کیلومتر است.

#### ۳- مطالعات هیدروژئولوژی

بیشترین میزان بارش باران در منطقه مورد مطالعه، اسفند ماه با مقدار ۷۵۰ میلی‌متر گزارش شده است. بررسی‌های میدانی از منطقه و نیز مطالعه تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که سوی جریان‌های آب زیرزمینی و سطحی به سوی رودخانه سروان (مسیر رودخانه به موازات امتداد تونل و در سمت باختر آن در جریان است) است (شکل ۳). ۲۶ چشمه قابل دسترس در منطقه شناسایی و مطالعه شده است. بیشترین تعداد چشمه‌ها در مسیر تونل متعلق به زیر حوضه‌های زی، هیرتا و به‌بازان است. موقعیت ارتفاعی چشمه‌ها نسبت به محور تونل نشان می‌دهد که تمام چشمه‌ها در تراز بالاتر از ارتفاع تراز تونل (۶۳۰ متر) قرار می‌گیرند. میانگین دبی آب چشمه‌های زیر حوضه به‌بازان و زی در طول یک سال به دست آمده است (شکل ۴)؛ دبی در ماه‌های فروردین و اسفند بیشترین مقدار را دارد. چشمه به‌بازان با دبی بیش از ۲۰۰ لیتر بر ثانیه در فاصله افقی ۱۳۰۵ متر از مسیر تونل با تراز ارتفاعی ۱۲۰۰ متر بزرگ‌ترین چشمه در محدوده تونل به شمار می‌رود.

#### ۴- مطالعات آزمایشگاهی

جنس سنگ نقش به‌سزایی در گسترش درزه شکاف در توده سنگ دارد؛ به‌گونه‌ای که سنگ‌های سخت و شکننده استعداد بیشتری برای درزه‌دار شدن از

طبق مشاهدات حفاری، مقدار دبی آب ورودی به درون تونل در برخورد با این واحدها بیشترین حجم را دارد؛ به گونه‌ای که در متر از ۹۰۰۰ از سینه کار حفاری (سوی حفاری از جنوب باختر به شمال خاور است)، مقدار آب ورودی به تونل ۳۸۲ لیتر بر ثانیه ثبت شده است. این مقدار آب توسط شکستگی‌های باز لایه‌های آهکی به درون تونل هدایت شده است (شکل ۱۱).

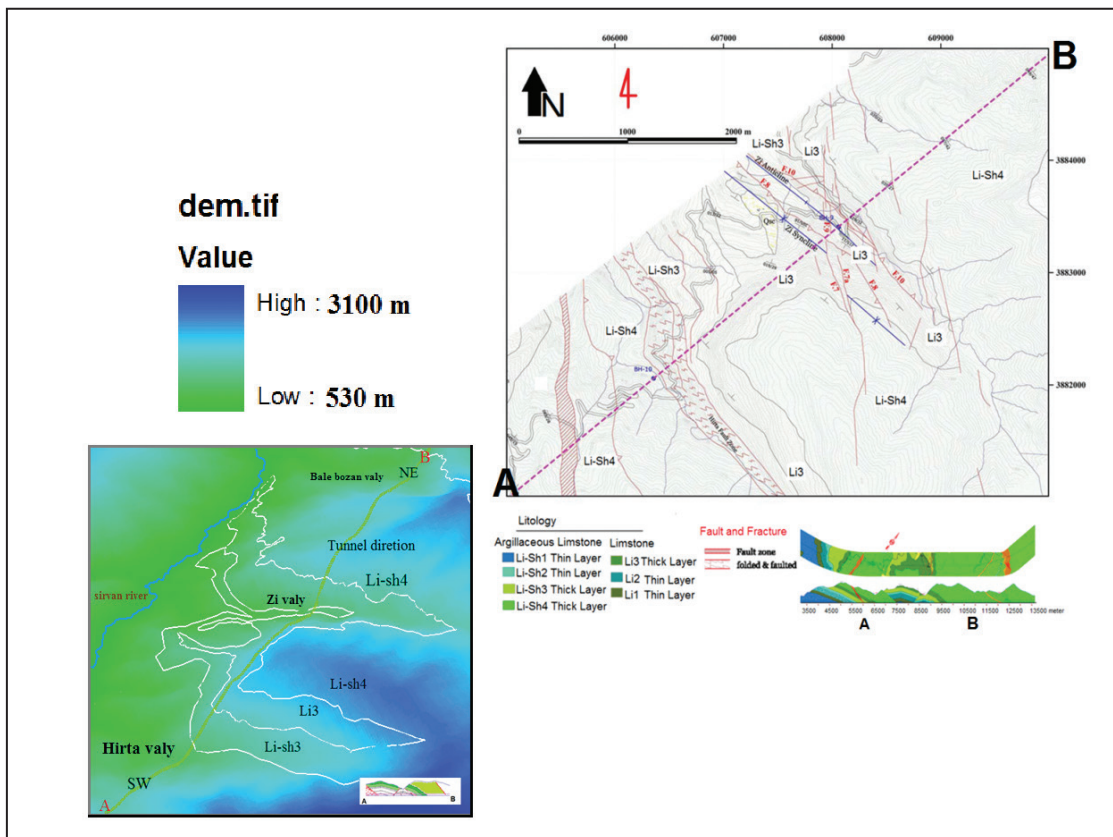
### ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، مناطق مستعد هجوم آب به درون تونل انتقال آب نوسود در منطقه مرزی ایران و عراق با استفاده از تصویر ماهواره‌ای استر شناسایی و بررسی شد. به منظور شناسایی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی دارای پتانسیل هجوم آب، شواهد هیدروژئولوژی در تصویر ماهواره‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. روش‌های استخراج اتوماتیک خطواره‌ها، شاخص پوشش گیاهی NDVI و تحلیل مدل ارتفاعی رقومی به ترتیب برای تعیین تراکم شکستگی‌ها، توزیع چشمه‌ها و مورفولوژی لایه‌های زمین‌شناسی به کار گرفته شد. نتایج تجربی نشان داد که آزمایشات خطواره‌های استخراج شده از تصویر ماهواره‌ای انطباق مناسبی با امتداد گسل‌های منطقه دارد. شاخص پوشش گیاهی با نرخ آشکارسازی ۷۴ درصد نشان‌دهنده یک فاکتور مؤثر در تعیین موقعیت چشمه‌ها با استفاده از تصویر ماهواره‌ای است. شاخص‌های مورفولوژیکی منطقه با برجسته‌نمایی مدل ارتفاعی رقومی تصویر استر بررسی و نشان داده شد که مدل ارتفاعی ابزار مناسبی برای تعیین الگوی شکل‌گیری کواستا و تعیین ارتباط مورفولوژی منطقه با توزیع شکستگی‌هاست. مقایسه نتایج مطالعه با گزارش‌های حفاری نشان می‌دهد که واحدهای Li3 و Li-Sh3 به دلیل شکستگی‌های فراوان عامل اصلی هجوم آب به درون تونل هستند. چشمه‌های فراوان در امتداد این شکستگی‌ها سبب افزایش شاخص پوشش گیاهی NDVI در تصویر ماهواره‌ای شده است.

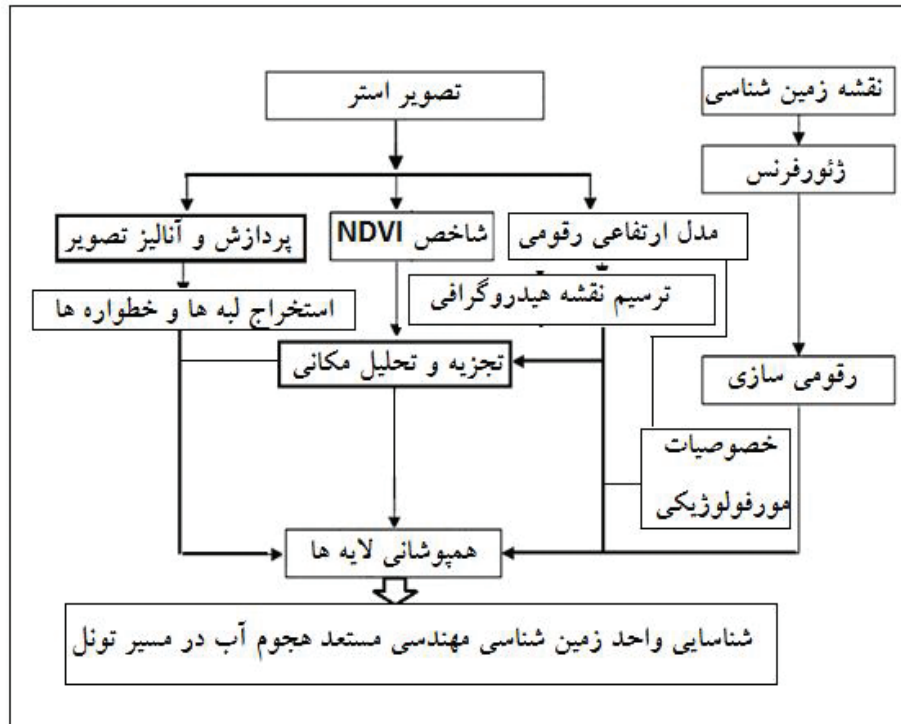
مشاهده نتایج بارش و دبی چشمه‌ها نشان می‌دهد که مدت زمان میان ورود آب به زمین (تغذیه آب زیرزمینی) و خروج آب از چشمه‌ها (تخلیه آب زیرزمینی) به طور میانگین کمتر از یک ماه به طول می‌انجامد؛ که این موضوع نشان‌دهنده گسترش شکستگی‌ها و در نتیجه افزایش سرعت جریان آب زیرزمینی در این زیرحوضه‌هاست. یکی دیگر از عواملی مرتبط با ویژگی‌های هیدروژئولوژی منطقه، شرایط مناسب رویش گیاهان با سبزی‌نگی بالا به عنوان شاخصی برای نشاندادن آب زیرزمینی و ظهور چشمه‌هاست. رویش گیاهان با سبزی‌نگی بالا در پیرامون این چشمه‌ها دلیل بر مناسب بودن شرایط آب زیرزمینی است. در این مطالعه با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI نقشه رده‌بندی تراکم پوشش گیاهی منطقه تهیه شد (رابطه ۱).

به منظور تعیین نرخ آشکارسازی (Detection rate) شاخص پوشش گیاهی در برآورد موقعیت احتمالی چشمه‌ها و تعیین واحدهای مستعد ظهور چشمه نقشه تراکم احتمالی چشمه‌ها رسم شد. نمودار آماری موقعیت چشمه در شکل ۹ ارائه شده است. بیشترین تعداد چشمه‌ها با شاخص پوشش گیاهی برابر با ۰/۳۲ قرار می‌گیرند. مطابق با شاخص پوشش گیاهی نقشه، موقعیت و تراکم احتمالی چشمه‌ها با نرخ آشکارسازی ۷۴ درصد رسم شد (شکل ۱۰).

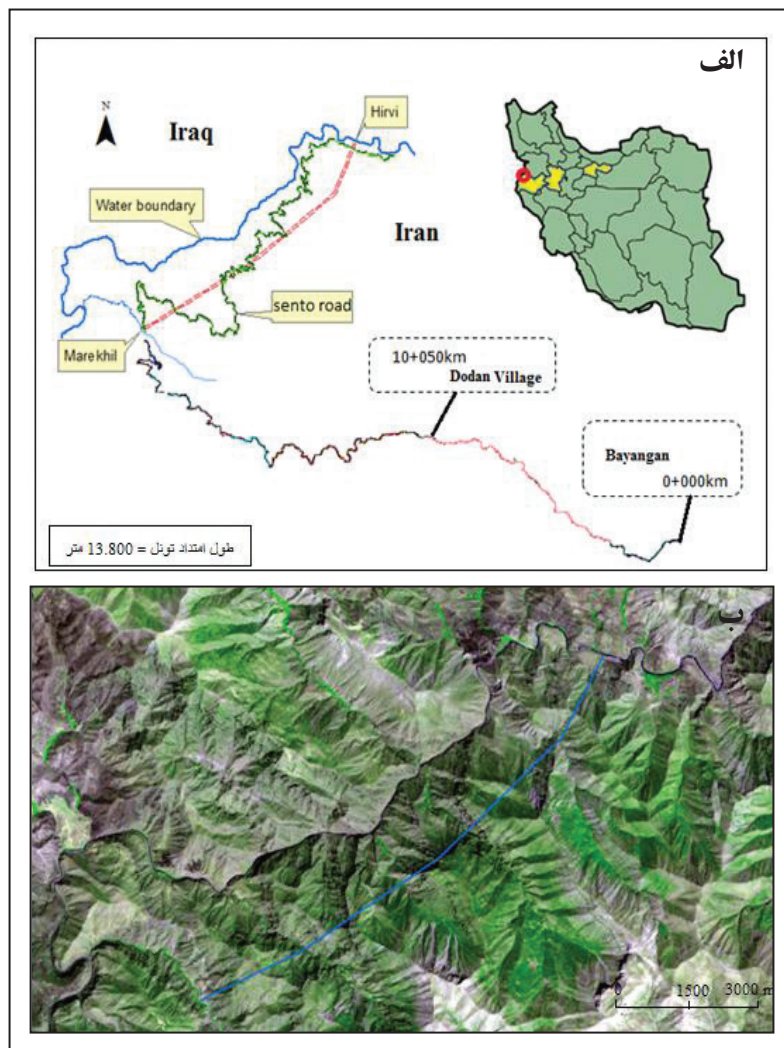
با تلفیق لایه‌های زمین‌شناسی، نقشه توزیع احتمالی چشمه‌ها و خطواره‌ها مشخص شد که واحدهای Li3 و Li-Sh3 به علت حضور لایه‌های آهکی شکننده و وجود چشمه‌های فراوان در مرز میان این واحدها بیشترین پتانسیل هجوم آب زیرزمینی به درون تونل را دارند (شکل ۱۱). به نظر می‌آید واحد Li3 با وجود شکستگی‌های عمودی فراوان، آب را از ارتفاعات به سوی مناطق پست‌تر انتقال می‌دهد و جریان آب زیرزمینی پس از برخورد به واحد Li-Sh3 به صورت چشمه در سطح زمین ظاهر می‌شود. وجود تراکم پوشش گیاهی و چشمه‌های با پراکندگی زیاد نشان‌دهنده این رخداد در سطح زمین است. با فرض بر اینکه مسیر تونل مرز میان این دو واحد را قطع می‌کند؛ احتمال بیشترین حجم ورودی آب به درون تونل پیش‌بینی می‌شود.



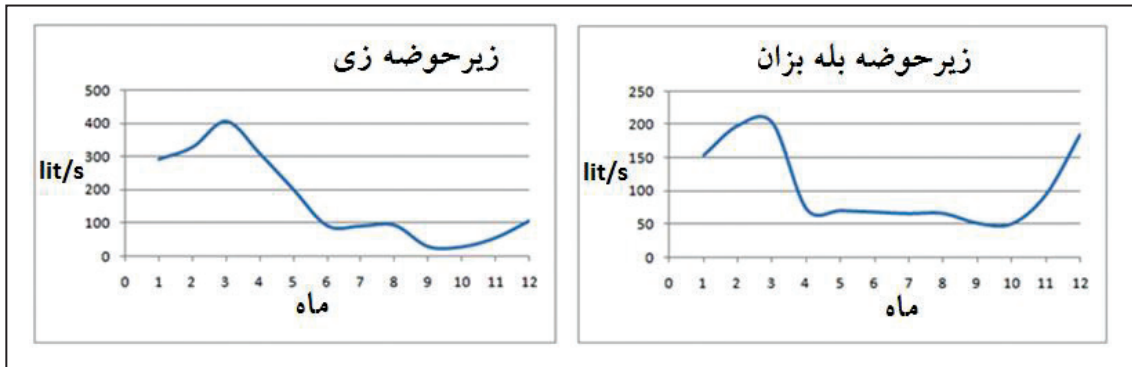
شکل ۱- الف) نقشه زمین‌شناسی، مقطع زمین‌شناسی و ب) مدل ارتفاعی رقومی از موقعیت واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تونل انتقال آب نوسود.



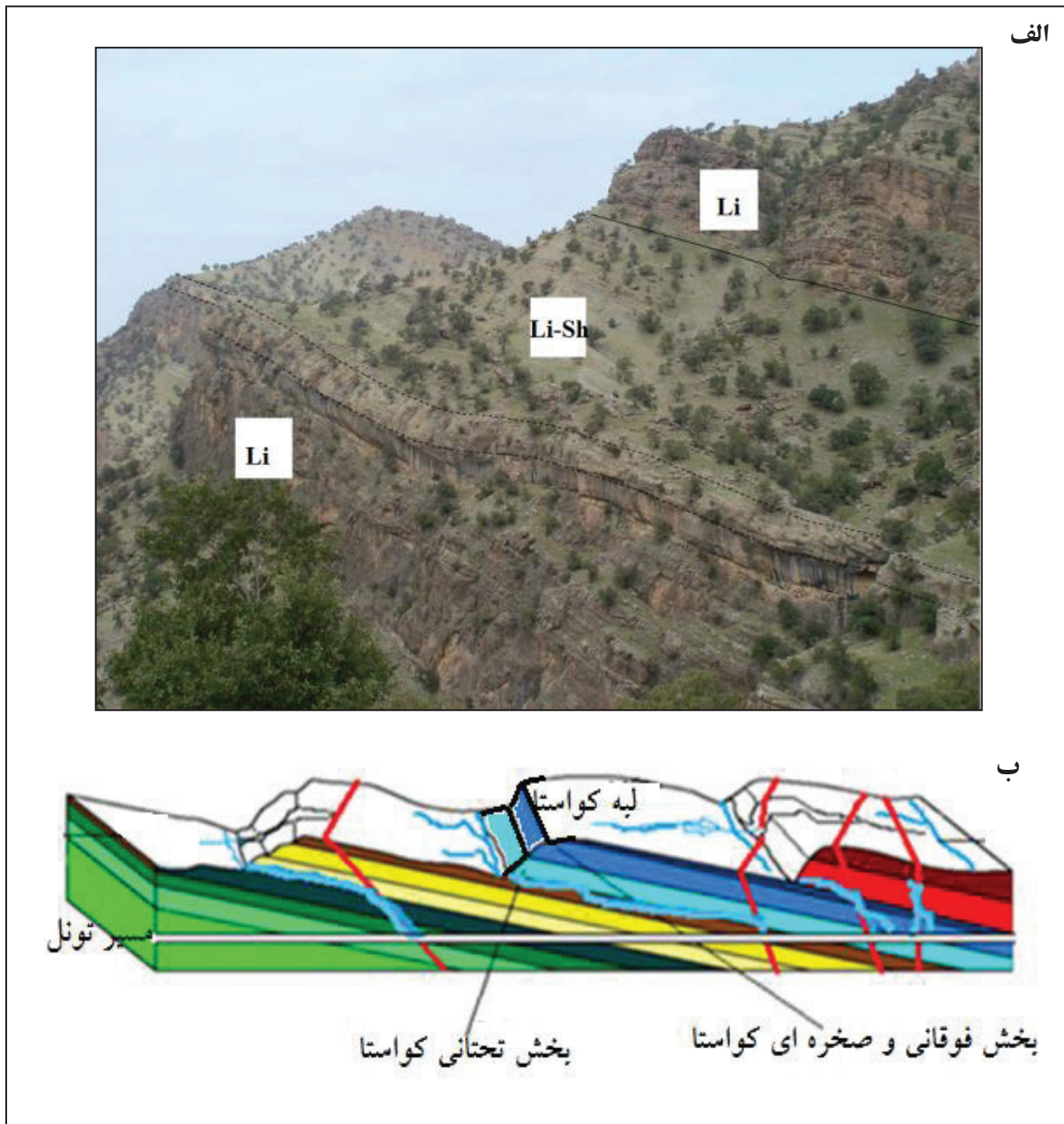
شکل ۲- فلوجارت روش مطالعه برای شناسایی واحدهای زمین‌شناسی مستعد هجوم آب در تونل انتقال آب نوسود.



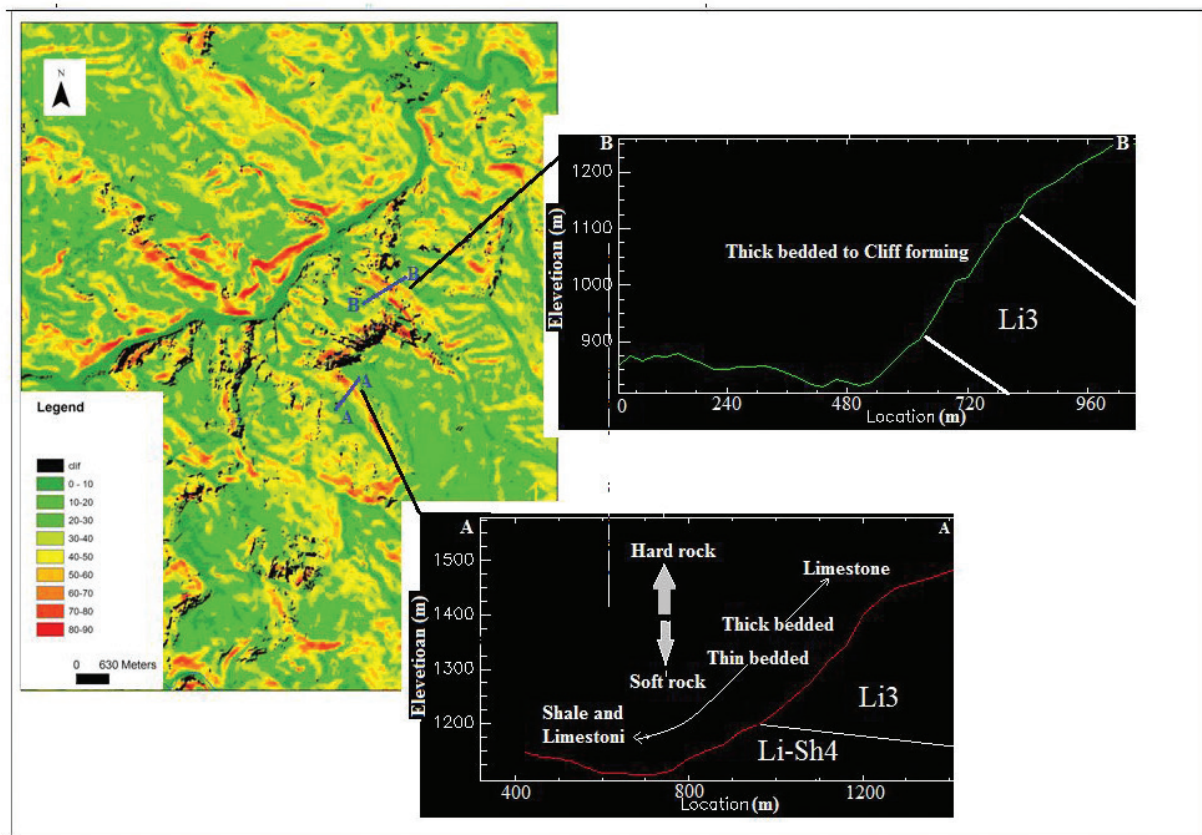
شکل ۳- الف) موقعیت قرارگیری و مسیر دسترسی به پروژه تونل انتقال آب نوسود و ب) تصویر ترکیب رنگی RGB (باندهای ۱، ۲، و ۳) استر از منطقه. خط چین در شکل الف و خط در شکل ب راستای تونل را نشان می‌دهند.



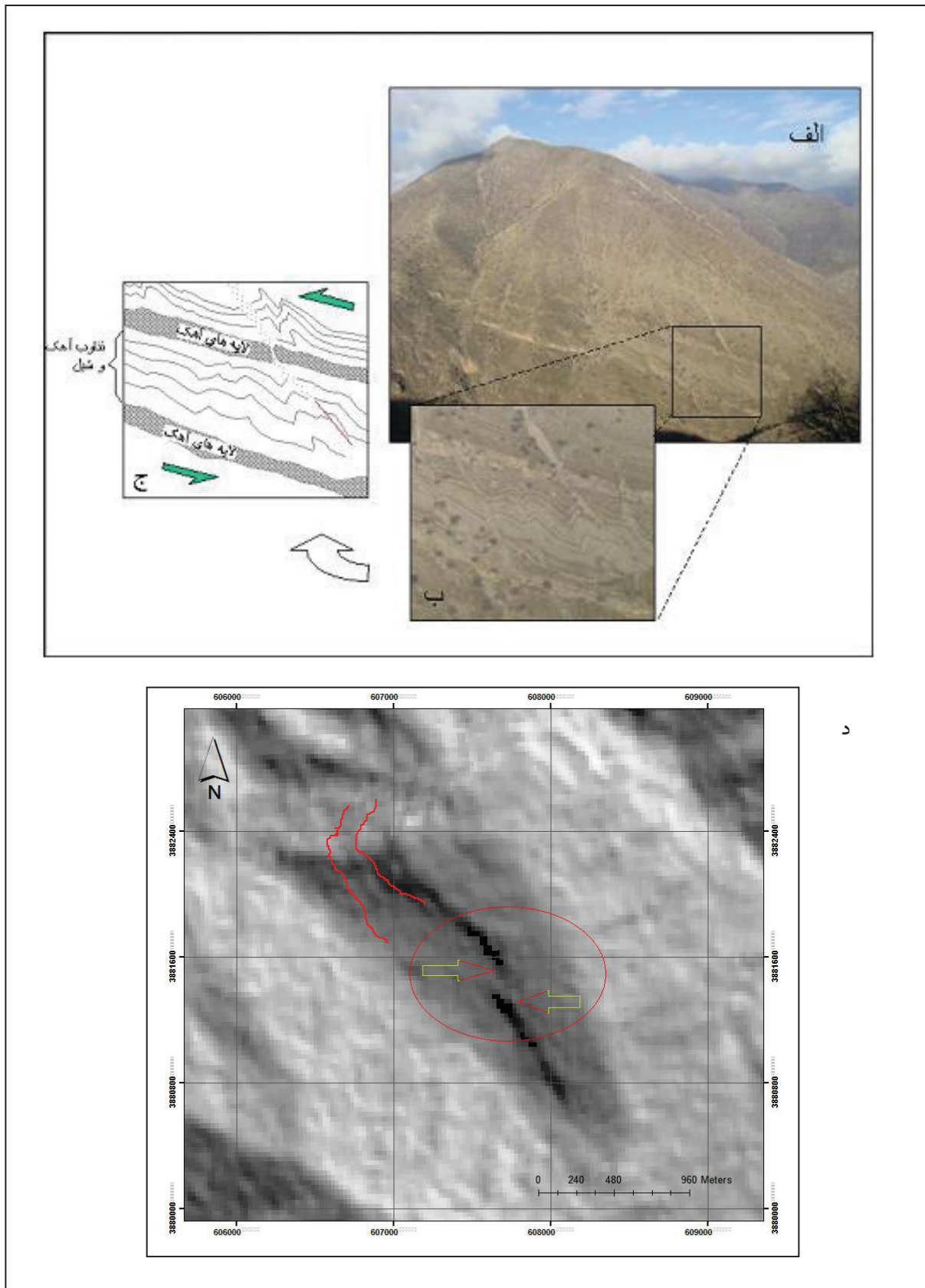
شکل ۴- تغییرات دبی آب چشمه‌ها.



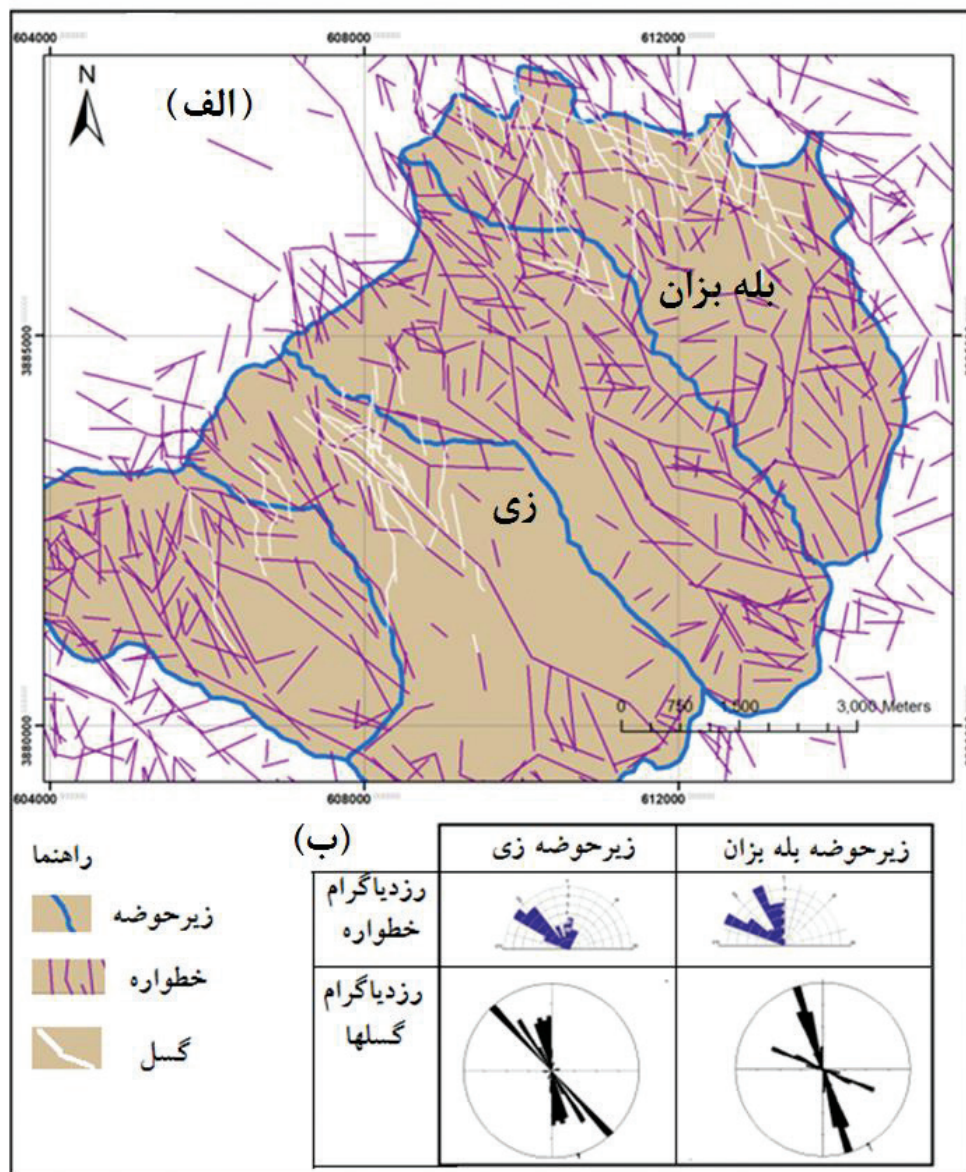
شکل ۵- الف) مورفولوژی منطقه مورد مطالعه؛ ب) آثار به جای مانده از ساختارهای تاقدیسی در مسیر تونل. پهنه‌های شکسته و خرد شده در قالب شکل‌های کواستا هستند.



شکل ۶- شواهد مورفولوژی منطقه مورد مطالعه به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای استر: الف) مدل ترکیبی شیب و برجسته‌نمایی منطقه؛ ب) مقطع زمین‌شناسی واحد صخره‌ای زیرحوضه زی؛ ج) مقطع زمین‌شناسی واحد صخره‌ای زیرحوضه هیرتا.

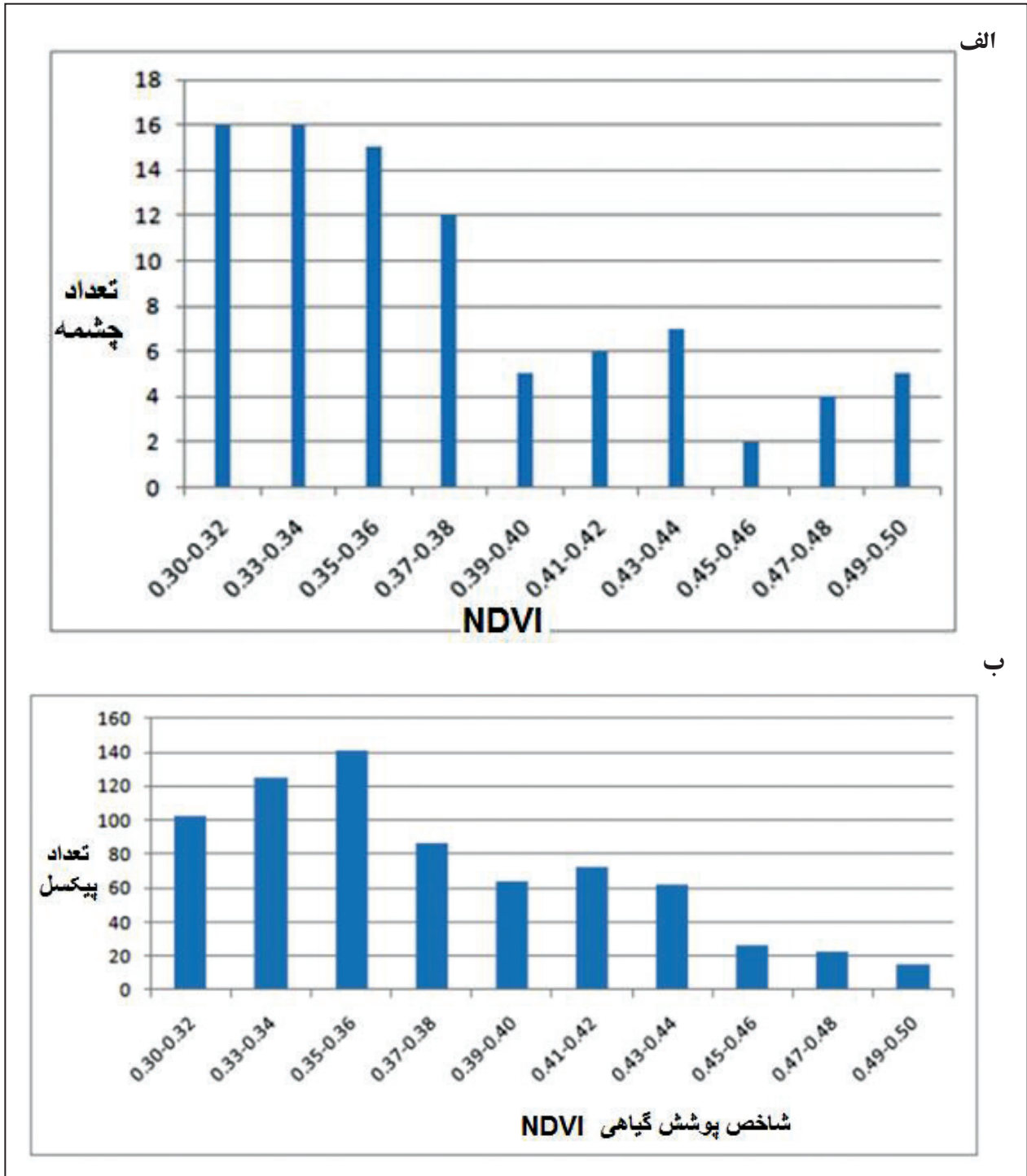


شکل ۷- الف، ب و ج) وضعیت ساختاری لایه‌های رسوبی در منطقه تونل؛ د) مدل سایه ارتفاعی منطقه تونل با آزمون تابشی ۴۵ درجه نور خورشید و زاویه تابش ۳۰ درجه از سطح افق.

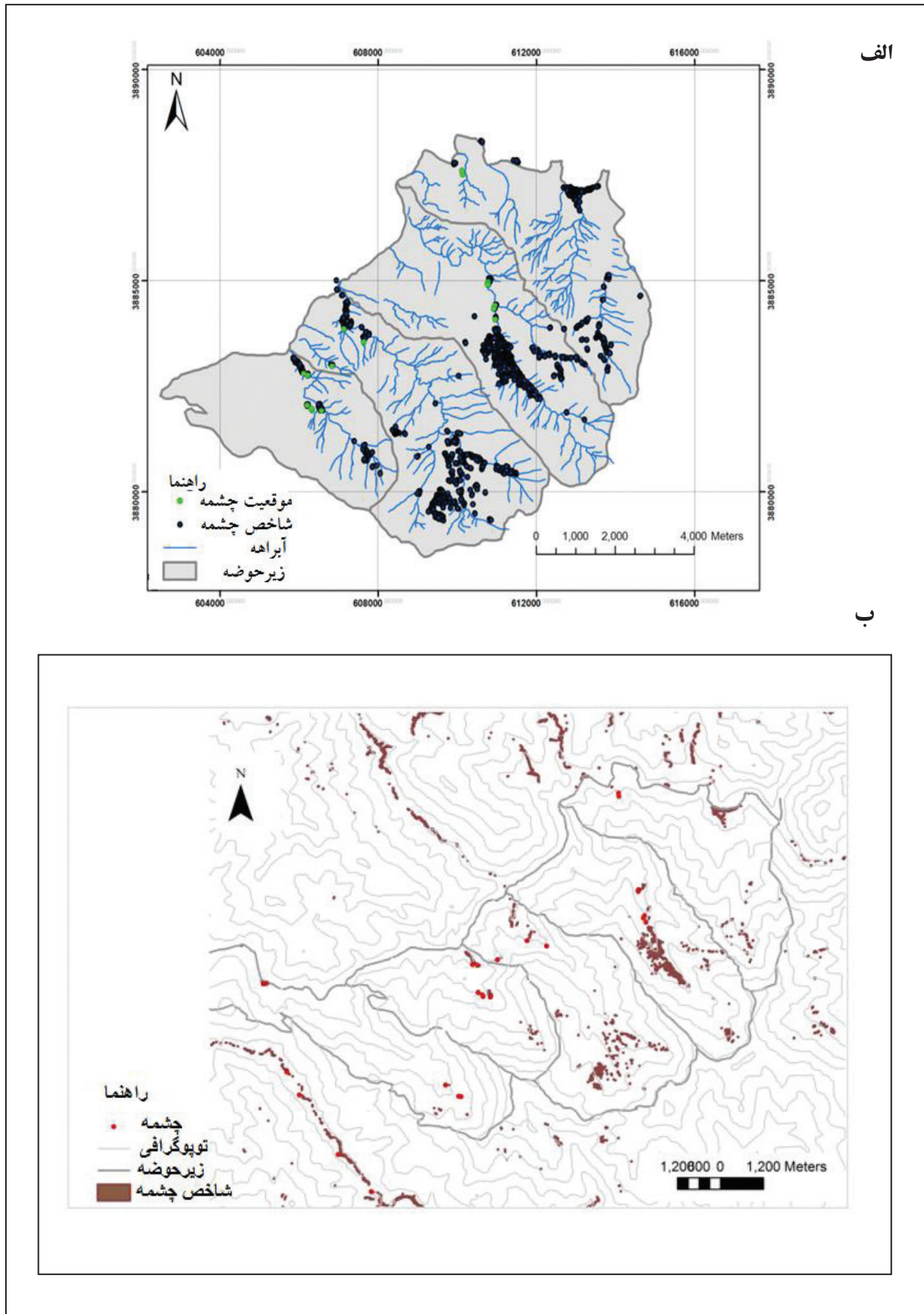


شکل ۸- الف) نقشه خطواره‌ها و گسل‌های منطقه مورد مطالعه در دره زی ناشی از شکل‌گیری تاقدیس ناوی‌شکل در مسیر تونل؛  
 ب) جهت‌گیری گسل‌ها و آزمون خطواره‌ها.

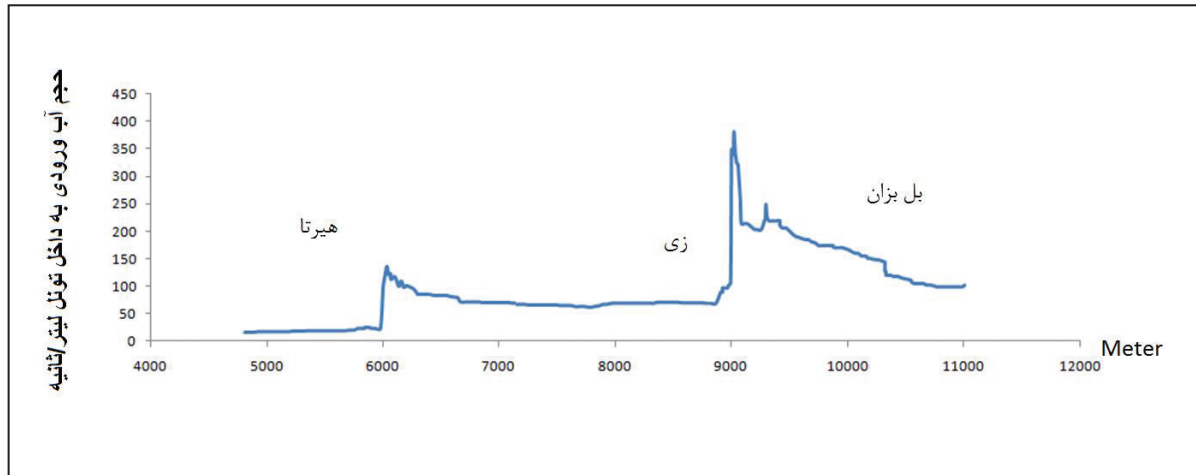




شکل ۹- نمودار آماری: الف) موقعیت احتمالی چشمه‌ها با استفاده داده‌های تصویری و ب) موقعیت چشمه‌های ثبت شده در منطقه نسبت به شاخص NDVI.



شکل ۱۰- نقشه توزیع احتمالی چشمه‌ها نسبت به شبکه هیدروگرافی و توپوگرافی.



شکل ۱۱- نمودار دبی آب ورودی بر حسب لیتر بر ثانیه.

جدول ۱- شاخص شکنندگی واحدهای زمین شناسی مهندسی.

شماره	واحد زمین شناسی مهندسی	میانگین مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	میانگین مقاومت کششی (MPa)	ستبرای لایه (m)	شاخص شکنندگی
۱	Li-Sh1	۲۵-۵ (۲۰) ۱۵۰-۱۰۰ (۱۲۵)	۵-۱۰ (۲/۵) ۱-۲/۵ (۲)	نامشخص	-
۲	Li-Sh2	۲۰-۱۰ (۲۰) ۱۰۰-۵۰ (۷۵)	۱۰-۲/۵ (۵)	۰/۴ ۱/۵-۰/۰۰۵/۱	۱۲۰
۳	Li-Sh3	۲۰-۵ (۲۰) ۱۰۰-۵۰ (۷۵)	۱۰-۲/۵ (۵)	≤ ۱/۵	۲۵۰
۴	Li-Sh4	۲۰-۱۰ (۲۰) ۱۰۰-۵۰ (۷۵)	۱۰-۲/۵ (۵)	۰/۳ ≤	۲۰۰
۵	Li1	۱۰۰-۵۰ (۷۵)	۱۰-۲/۵ (۵)	≥ ۰/۳	۱۵۰
۶	Li2	۱۵۰-۱۰۰ (۱۲۵)	۱۰-۲/۵ (۵)	۱/۵-۰/۱	۲۰۰
۷	Li3	۱۰۰-۲۵۰ (۱۲۵)	۵-۱۵ (۱۰)	۵-۱۰	۴۰۰

## References

- Alavi, M., 1994- Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran: new data and interpretations, *Tectonophysics*, 229:211–238.
- Bedini, E., 2009- Mapping lithology of the Sarfartoq carbonatite complex, southern West Greenland, using HyMap imaging spectrometer data, *Remote Sensing Environment*, 113(6):1208–1219.
- Bureau of Reclamation, 1997- Engineering Geology Field Manual, Technical report, United States Government, Washington, DC.
- Choi, Y., 2009- Tunneling Analyst: A 3D GIS extraction for rock mass classification and fault zone analysis in tunneling, *Computers & Geosciences*, 35: 1322-1333.
- El Tani, M., 2003- Circular tunnel in a semi-infinite aquifer, *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 18: 49-55.
- Gloaguen, R., Marpu, P., Niemeier, I., 2007- Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data, *Nonlinear Proc Geophys*, 14: 131–138.
- Goodman, R. E., Moye, A., Schalwyk, V., Javandel, I., 1965- Groundwater inflow during tunnel driving, *Engineering Geology*, 39–56.
- Hugman, R. H. and Friedman, M., 1979- Effects of Texture and Composition on Mechanical Behavior of Experimentally Deformed Carbonate Rock, *American Association of Petroleum Geology Bulletin*, 9: 1478-1489.
- ISRM, 1978- Standardization laboratory and field tests, *Int. J. of Rock mechanics and Min. Sci. and Geomech Testing and Monitoring* –Pergamon Press, Oxford.
- Karlsrud, K., 2001- Water control when tunnelling under urban areas in the Oslo region, NFF publication, 12: 27–33, NFF.
- Kaya, S., Müftüoğlu, O. and Tüysüz, O., 2004- Tracing the geometry of an active fault using remote sensing and digital elevation model: Ganos segment, North Anatolian Fault zone, Turkey, *Int J Remote Sens* 25:3843–3855.
- Koike, K., Nagano, S. and Ohmi, M., 1995- Lineament analysis of satellite images using a Segment Tracing Algorithm (STA), *Comput Geosci*, 21:1091–1104.
- Kresic, N., 1994- Remote sensing of tectonic fabric controlling groundwater flow in Dinaric karst, In proceedings of the tenth thematic conference on geologic remote sensing, 1: 161-167.
- Lei, S., 1999- An analytical solution for steady flow into a tunnel, *Ground Water*, 37: 23–26.
- Philip, G., 2007- Remote sensing data analysis for mapping active faults in the northwestern part of Kangra Valley, NW Himalaya, India. *Int J Remote Sens* 28:4745–4761.
- Sinclair, S. W., 1980- Analysis of Macroscopic Fractures on Teton Anticline, Northwestern Montana, M.S. Thesis, Dept. of geology, Texas A&M University, College Station, Texas: 102.
- Vincent, R. K., 1997- *Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ : 400.

# The role of tectonic structures and stratigraphy in predicting influx of water into the tunnel using remote sensing (Case Study: Nosoud water-transport tunnel, part 1-A)

M. Heydari<sup>1\*</sup> and M. Sharafi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Geology, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup>M. Sc., Department of Geology, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 2014 December 16

Accepted: 2016 December 05

## Abstract

The use of remote sensing combined with field surveys can be used as an economic approach to detect the areas that are susceptible to the influx of water into tunnels. This study aims at investigating potential zones of groundwater influx in part 1-A of the Nosoud water-transport tunnel located in the NW of Kermanshah province. Stratigraphic units of the area are composed of limestone and shale layers, which have formed alternating hard and soft sequences at the tunnel site. Fractured brittle limestone layers alternating with impermeable shale layers are the most important factor controlling the influx of water into the Nosoud tunnel. The danger of possible mine explosions prevented us from a survey along the whole length of the tunnel. Hence we classified these lithologies into two types labeled as Li and Sh which representing limestone and shale respectively. In order to explore layers that could potentially lead to water influx, we used ASTER satellite images to analyze the geohydrologic evidences across the area. Results suggest that the tunnel has a high risk of groundwater influx in places where the Li3 and Li-Sh3 units are encountered. Moreover, observations during tunnel excavation show that the major cause of water influx into the tunnel are preferentially concentrated in zones where hard layers with open fractures are crossed. This is considerably compatible with the results of satellite image processing model.

**Keywords:** Tectonic structures, Stratigraphy, Remote sensing, Water influx, Tunnel.

For Persian Version see pages 69 to 80

\*Corresponding author: M. Heydari; E-mail: heidarim\_enggeol@yahoo.com