



Prediction of hazards caused by faults in tunnel alignments; case study: the third part of Tehran- North Freeway

Jafar Hassanpour^{1✉} , Fatemeh Shayan², and Ali Uromeihy³ 

1. Corresponding Author, Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hassanpour@ut.ac.ir
2. Ph.D. Graduate, Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: f.shayan@modares.ac.ir
3. Professor, Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: uromeiea@modares.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 24 May 2025

Received in revised form 24 July 2025

Accepted 18 September 2025

Available online 29 September 2025

Keywords:

Fault Zone,
Fault Classification,
Geological Hazards,
Tunneling.

ABSTRACT

Objective: The construction of long and deep tunnels in mountainous areas where complex tectonic structures such as fault zones are active, is associated with geological challenges and excavation difficulties. On the other hand, studying the geological and geotechnical characteristics of the fault rocks is challenging because of the difficulty of sampling and their heterogeneous nature. Therefore, detection of faults and prediction of their behavior in tunnel excavation are of great importance. Accurate prediction of these behaviors can be effective in preventing long term delays and increasing time and cost.

Method: In this paper, we attempted to identify the most important faults in tunnel projects in the third zone of Tehran- North Freeway and to classify the faults them using a new geological hazards classification framework, recently proposed for the long and deep tunneling projects. In this classification, the probability of occurrence of major geological hazards related to fault zones in tunneling projects including water inflow, collapse of tunnel, instability of the tunnel face and squeezing are evaluated based on effective parameters such as lithology, rock quality, overburden, tunnel diameter, fault specifications and relative orientation of fault.

Results: The estimated geological hazard indices for each of the important identified faults in the project including, Dasht-e Nazir- Nater, Chiten- Dozbon and MarzanAbad faults show that these faults will be considered as serious challenges for tunnels through them including tunnels no. 1, 6 and 10. Among these faults, Chiten- Dozbon fault is known as the most challenging fault zone.

Conclusions: Based on the results of evaluation and prediction of this study the identified faults are classified as extremely problematic and very problematic faults. Therefore, it is suggested to consider necessary arrangements during construction for crossing these critical fault zones.

Cite this article: Hassanpour, J., Shayan, F., & Uromeihy, A. (2025). Prediction of hazards caused by faults in tunnel alignments; case study: the third part of Tehran- North Freeway. *Incidents and Disasters Resilience*, 1(3), 3-18. <https://doi.org/10.22034/1.3.1>



© Author(s) retain the copyright.

Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).

DOI: <https://doi.org/10.22034/1.3.1>

پیش بینی مخاطرات ناشی از حضور گسل ها در مسیر تونل ها؛ مطالعه موردی: تونل های منطقه

سوم آزادراه تهران - شمال

جعفر حسن پور^۱، فاطمه شایان^۲، علی ارومیه ای^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه زمین شناسی مهندسی و زمین ساخت، دانشکده زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hassanpour@ut.ac.ir

۲. دانش آموزانه دکتری، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: f.shayan@modares.ac.ir

۳. استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: uromeia@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۳/۰۳/۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۰۲/۰۵/۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۲۷/۰۶/۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۰۷/۰۷/۱۴۰۴

کلیدواژه ها:

پهنه گسلی،

رده بندی گسل ها،

مخاطرات زمین شناسی،

تونل سازی.

هدف: احداث تونل های بلند و عمیق در ایران در نواحی کوهستانی همراه با فعالیت های تکنیکی، به دلیل وجود ساختارهای زمین ساختی پیچیده نظیر گسل ها با چالش های زمین شناسی و دشواری های حفاری همراه است. از سوی دیگر، بررسی ویژگی های زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی سنگ های گسلی به دلیل دشواری نمونه برداری و ماهیت ناهمگن آن ها بسیار چالش برانگیز است. از این رو، شناسایی گسل ها و پیش بینی رفتار آن ها در فرایند حفاری تونل از اهمیت ویژه ای برخوردار است. پیش بینی دقیق این رفتارها می تواند در جلوگیری از تأخیرهای طولانی مدت و افزایش زمان و هزینه بسیار مؤثر باشد.

روش پژوهش: در این مقاله سعی شده است تا با شناسایی مهم ترین گسل ها در مسیر پروژه های تونلی منطقه سوم آزادراه تهران - شمال و با بهره گیری از چهارچوب رده بندی مخاطرات زمین شناسی پهنه های گسلی در تونل ها، طبقه بندی گسل ها انجام گردد. در این رده بندی، احتمال وقوع مخاطرات زمین شناسی اصلی مرتبط با پهنه های گسلی در پروژه های تونل سازی شامل هجوم آب، ریزش کلی تونل، ناپایداری سینه کار و لهیدگی بر اساس پارامترهای مؤثر نظیر لیتولوژی، کیفیت سنگ، فشار آب، ارتفاع روباره، قطر تونل، اهمیت گسل و جهت گیری نسبی گسل ارزیابی می شود که به تفاوت های رفتاری هر یک از گسل ها در تونل های مختلف و وابستگی آن ها به شرایط زمین شناسی و فنی خاص هر پروژه اشاره دارد.

یافته ها: شاخص های خطر زمین شناسی برآورد شده در این پژوهش برای هر یک از گسل های شناسایی شده مهم در پروژه شامل گسل های چین-دزین، دشت نظیر-ناتر و مرزن آباد نشان می دهد که این گسل ها چالش های جدی برای تونل های عبوری از آن ها شامل تونل های شماره ۱، ۶ و ۱۰ محسوب خواهند شد. در میان این گسل ها، گسل چین-دزین به عنوان چالش برانگیزترین زون گسلی شناسایی شده است.

نتیجه گیری: بر اساس نتایج ارزیابی ها و پیش بینی ها، گسل های مورد مطالعه در رده گسل های بحرانی و بسیار بحرانی طبقه بندی می شوند؛ بنابراین پیشنهاد می شود تمهیدات لازم برای عبور از این پهنه های گسلی بحرانی در نظر گرفته شود.

استناد: حسن پور؛ جعفر، شایان؛ فاطمه، ارومیه ای؛ علی. (۱۴۰۴). پیش بینی مخاطرات ناشی از حضور گسل ها در مسیر تونل ها؛ مطالعه موردی: تونل های منطقه سوم آزادراه تهران - شمال. *تاب آوری در برابر حوادث و سوانح*، ۱ (۳)، ۱۸-۳. <https://doi.org/10.22034/1.3.1>



© نویسندگان.

ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.

مقدمه

گسل‌ها یکی از مهم‌ترین انواع ناپیوستگی در محیط‌های سنگی هستند که ناپایداری فضاهای زیرزمینی و تونل‌ها و همچنین ترانشه‌ها و دامنه‌های طبیعی را سبب می‌شوند. این ناپیوستگی‌ها در مقایسه با سایر انواع شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌های کوچک‌تر، از ناهمگنی و پیچیدگی بیشتری برخوردارند و مقادیر قابل‌توجهی از کرنش را در پوسته بالایی زمین تحمل نموده‌اند. به‌طور کلی، واژه گسل به هر سطح یا ناحیه باریکی که جابه‌جایی برشی در امتداد آن قابل‌مشاهده باشد، اطلاق می‌شود.

درک مناسب از پیدایش و ارزیابی کامل ساختار داخلی گسل‌ها، پیش‌نیازی ضروری برای پیش‌بینی رفتار ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های گسلی در پروژه‌های مختلف از جمله پروژه‌های احداث راه و تونل است؛ اما، اغلب بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها به دلیل ماهیت ناهمگن آن‌ها که ترکیبی از توده‌سنگ‌های ضعیف و مستحکم هستند، بسیار دشوار است.

اصطلاح پهنه گسلی به‌طور کلی به مجموعه‌ای از گسل‌های تقریباً موازی یا سطوح لغزشی اطلاق می‌شود که به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک هستند تا یک منطقه با پهنای مشخص را تشکیل دهند. ضخامت پهنه گسلی بسته به مقیاس مشاهده می‌تواند از چند سانتی‌متر یا متر تا حدود یک کیلومتر یا بیشتر در گسل‌های بزرگ متغیر باشد. اصطلاح پهنه گسلی در حال حاضر به‌طور متناقض در مورد بخش مرکزی گسل که در آن ساختارهای اصلی سنگ تقریباً یا به‌طور کامل از بین رفته‌اند یا در مورد هسته و زون تغییر شکل اطراف گسل به کار می‌رود. بنابراین، هنگام استفاده از این اصطلاح، ارائه توضیحات دقیق ضروری است (Fossen, 2010).

ساختار ساده‌شده‌ای از یک گسل در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است. بر اساس مطالعات، در بیشتر موارد منطقی است که هسته گسل^۱ و توده‌سنگ‌های اطراف آنکه تحت تغییر شکل‌های شکننده قرار گرفته و به‌عنوان زون آسیب گسل^۲ شناخته می‌شود، از یکدیگر متمایز شوند. زون کشش^۳، می‌تواند ضخامتی کمتر یا بیشتر از زون آسیب داشته باشد، یا اصلاً وجود نداشته باشد. شکل ۱ (ب)، (ج) تصاویر مفهومی از ساختار یک گسل و اجزای مختلف آن را در شرایط متفاوت نشان می‌دهد.

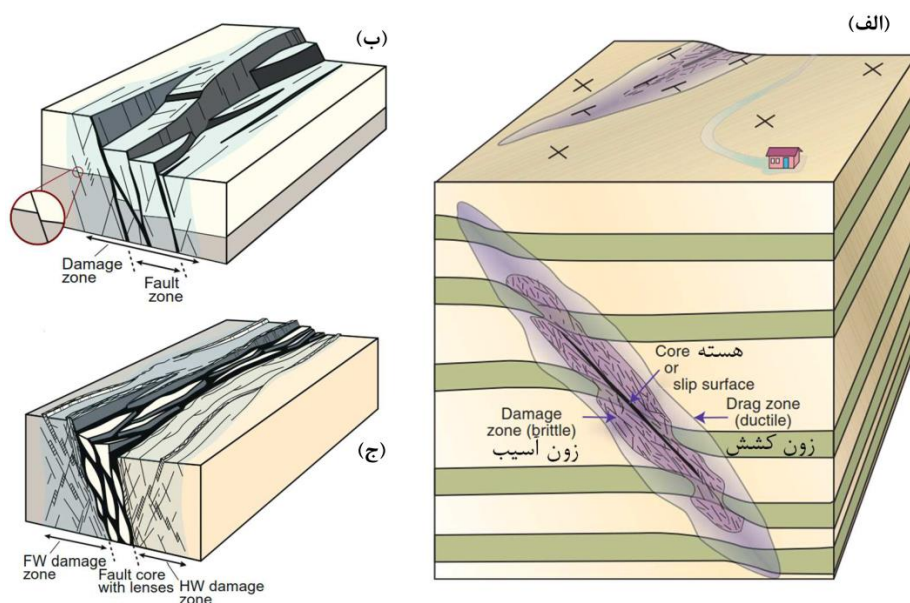
پهنه‌های گسلی ممکن است به‌طور کامل توسعه نیافته و فاقد هسته گسل مشخص باشند. حتی زمانی که تنها زون آسیب با شکستگی شدید وجود دارد، این نواحی می‌توانند کاهش کیفیت توده‌سنگ و افزایش نفوذپذیری را سبب شوند و در مهندسی سنگ باید مشابه پهنه‌های گسلی کاملاً توسعه‌یافته در نظر گرفته شوند (Brosch et al., 2006).

هسته یک گسل ناحیه‌ای است که حرکت لغزش اصلی در آن اتفاق می‌افتد و با شکستگی شدید و جابه‌جایی برشی مشخص می‌شود. هسته گسل ممکن است از یک سطح لغزش ساده با یک زون کاتاکلاستیک^۴ با ضخامت کمتر از یک میلی‌متر تا یک منطقه شامل چندین سطح لغزش، یا حتی یک ناحیه به‌شدت برش‌خورده با پهنایی تا چندین متر متغیر باشد که تنها بخش‌هایی محدود از ساختارهای اولیه سنگ ممکن است حفظ شده باشند. به‌طور کلی، میزان ضخامت هسته گسل‌ها با افزایش مقدار افت گسلی^۵ ارتباط مستقیم دارد. با این حال، تغییرات قابل‌توجهی حتی در امتداد یک گسل واحد و در شرایط لیتولوژی مشابه مشاهده می‌شود (Fossen, 2010).

زون آسیب گسل که با تراکم بالای ساختارهای ناشی از تغییر شکل شکننده مشخص می‌شود، هسته گسل را احاطه کرده و در بخش رأس گسل^۶ و همچنین در هر دو طرف هسته گسل گسترش می‌یابد. ساختارهای رایج در زون‌های آسیب گسلی شامل باندهای تغییر شکل^۷ شکستگی‌های برشی^۸، شکستگی‌های کششی^۹ و استیلولیت‌ها^{۱۰} هستند. فراوانی شکستگی‌های اطراف یک

1. Fault core
2. Fault damage zone
3. Drag zone
4. Cataclastic
5. Fault throw
6. Tip zone
7. Deformation bands
8. Shear fractures
9. Tensile fractures

گسل به عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، مقدار جابه‌جایی گسل، نوع گسل و عمق قرارگیری بستگی دارد (Nelson, 1985). زون آسیب گسل به دلیل گستردگی و تراکم شکستگی‌ها، تأثیر چشمگیری بر نفوذپذیری توده‌سنگ، جریان آب زیرزمینی و در نتیجه پایداری تونل دارد. از این رو، شناخت دقیق اجزای مختلف پهنه گسلی، به‌ویژه هسته و زون آسیب، در تحلیل و پیش‌بینی چالش‌های زمین‌شناسی در پروژه‌های تونل‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل خردشدگی شدید و حضور اجزای نرم، بخش‌هایی از پهنه‌های گسلی رفتار خاک‌مانند از خود نشان می‌دهند، هر چند اجزای سخت و مقاوم آن‌ها باعث ایجاد معماری پیچیده‌ای می‌شود. این ویژگی ترکیبی باعث می‌شود که جریان سیالات، توزیع فشار و پارامترهای ژئومکانیکی در پهنه‌های گسلی تحت تأثیر معماری داخلی و خصوصیات سنگ میزبان قرار گیرند.



شکل ۱. تصاویر مفهومی از ساختار یک گسل و اجزای مختلف آن؛ (الف) ساختار ساده‌شده یک گسل؛ منبع: Fossen, 2010؛ (ب) لغزش موضعی در دو یا چند ناحیه باریک با کرنش زیاد (هسته‌های گسلی با رنگ مشکی نشان داده شده است)؛ منبع: Childs et al., 1996؛ (ج) گسل با جابه‌جایی زیاد که نشان‌دهنده یک هسته مرکزی برشی گسترده‌تر و یک زون آسیب با کرنش کم در اطراف است؛ منبع: Fossen, 2020

در صنعت تونل‌سازی نیز، اصطلاح «پهنه گسلی» به یک بخش تونلی با طول محدود اشاره دارد که نیاز به اقدامات ویژه و مستلزم تأخیرهای قابل توجه و هزینه‌های زیاد است (Anagnostou & Kovári, 2005).

از دیدگاه زمین‌شناسی، پهنه‌های گسلی چالش مهمی برای برنامه‌ریزی، طراحی و ساخت تونل‌های بلند و عمیق هستند. مشکلات زمین‌شناسی متعددی از جمله ورود جریان آب بیش‌ازحد به داخل تونل، ریزش، ناپایداری سینه‌کار، هم‌گرایی سنگ‌های اطراف تونل، ورود گازهای سمی به داخل تونل و همچنین سایش غیرنرمال ابزارهای برش ممکن است به هنگام مواجهه با پهنه‌های گسلی رخ دهد که این مسائل می‌توانند آثار منفی قابل توجهی بر فرایند عملیات حفاری داشته باشند. هر یک از این رفتارها به عوامل مختلفی بستگی دارند.

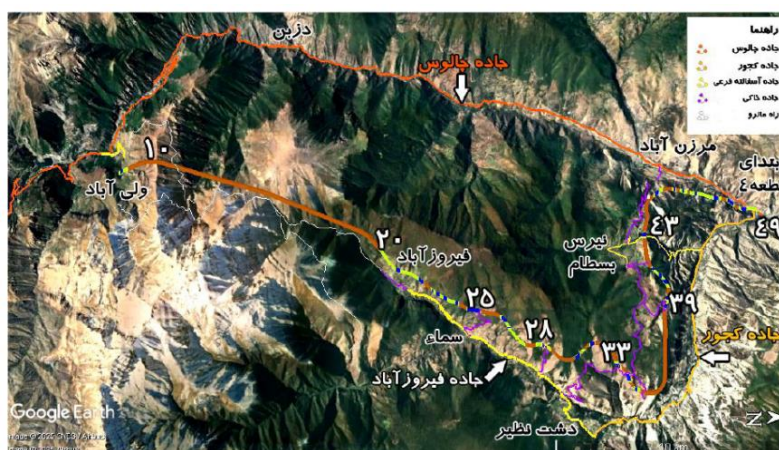
مرور رخدادهای ثبت‌شده در عملیات حفاری پروژه‌های تونلی مختلف از میان پهنه‌های گسلی نشان می‌دهد که شرایط تونل‌زنی در این مناطق می‌تواند بسیار متنوع باشد؛ به‌طوری‌که از شرایط بسیار دشوار و چالش‌برانگیز در پهنه‌های گسلی عمیق حاوی حجم زیادی از آب (آبخوان‌های پرفشار) تا شرایط مطلوب‌تر در سنگ‌های گسلی و خردشده با قابلیت حفرپذیری مناسب را شامل می‌شود (Goodarzi et al., 2021; Hassanpour, 2009; 2010; 2011; 2021; 2022).

در این مقاله، برای شناسایی گسل‌های دارای اهمیت بالا و پیش‌بینی میزان مخاطره‌آمیز بودن آن‌ها در تونل‌های منطقه سوم آزادراه تهران-شمال از چهارچوب رده‌بندی پیشنهادی ارائه‌شده توسط شایان، حسن‌پور و ارومیه‌ای (۲۰۲۵) استفاده شده است. در این رده‌بندی، گسل‌ها از دیدگاه وقوع مخاطرات زمین‌شناسی در پروژه‌های حفاری با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر زمین‌شناسی، ویژگی‌های گسل و هندسه تونل ارزیابی می‌شوند. بر اساس این چهارچوب، پهنه‌های گسلی در پنج رده مختلف شامل گسل‌های بدون مسئله تا گسل‌های به‌شدت مسئله‌دار/ بحرانی طبقه‌بندی می‌شوند که نشان‌دهنده چالش‌های مختلف تونل‌سازی در طول مراحل ساخت و پس از ساخت است.

معرفی پروژه

پروژه آزادراه تهران-شمال به‌عنوان یکی از طرح‌های عظیم عمرانی کشور به شمار می‌رود که با عبور از رشته‌کوه البرز دسترسی تهران را به شمال کشور و شهر چالوس میسر می‌سازد. این آزادراه در اجرا به چهار منطقه تقسیم شده است. از میان این چهار منطقه، مناطق اول، دوم و چهارم در حال بهره‌برداری، و منطقه سوم هم‌اکنون در مرحله مطالعه و اجرا است. منطقه سوم، حفاصل پل زنگوله تا مرزن‌آباد واقع شده است. برای این منطقه دو کریدور اصلی شامل دره فیروزآباد و دره چالوس پیشنهاد شده است که در این مطالعه کریدور دره فیروزآباد مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسیر حدود ۸ کیلومتر ابتدایی منطقه سوم تعیین تکلیف شده و باقی‌مانده مسیر در مرحله مطالعات برای انتخاب مسیر برتر است.

مسیر پیشنهادی در دره فیروزآباد به طول کل حدود ۵۰ کیلومتر، بعد از ورود به دره از طریق تونل شماره ۱ از دامنه غربی دره فیروزآباد ادامه مسیر می‌دهد و از ۳۵ کیلومتر بر روی دامنه شمالی رودخانه دشت‌نظیر قرار می‌گیرد. سپس، از ۴۴ کیلومتر وارد دره چالوس می‌شود. بخش موردنظر از این مسیر شامل ۱۸ تونل (به‌صورت دوقلو در باندهای چپ و راست) با طول حداقل ۱۰۰ و حداکثر ۱۱۱۴۷ متر و با مجموع طول حدود ۲۷۵۰۰ متر (حدود ۵۵۰۰۰ متر در دو باند چپ و راست) است. همچنین مسیر پروژه شامل ۲۹ پل به طول کل ۳۸۸۶ متر در باند چپ و ۲۷ پل با طول کل ۴۶۲۶ متر در باند راست است. موقعیت مسیر پروژه منطقه سه آزادراه تهران-شمال و راه‌های دسترسی به بخش‌های مختلف آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



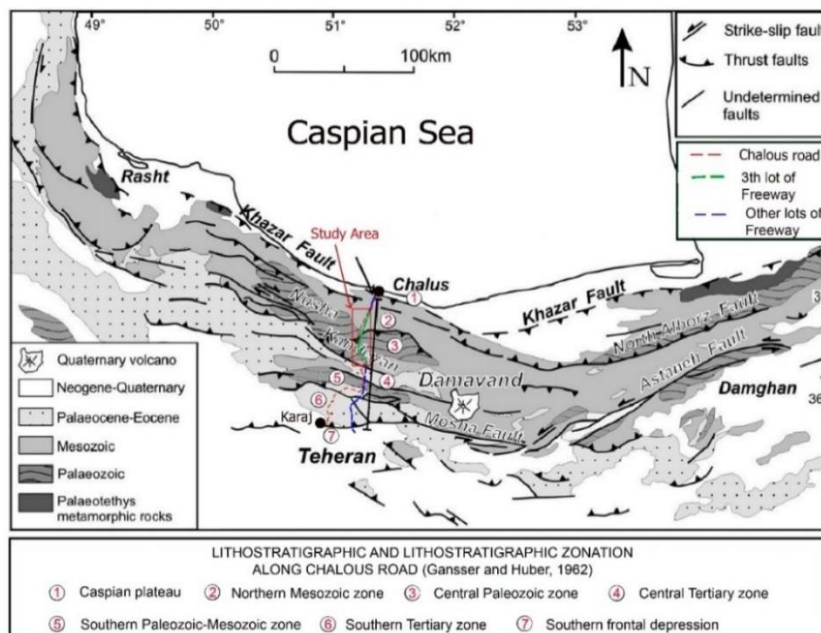
شکل ۲. نمایش موقعیت مسیر منطقه سه آزادراه تهران-شمال در دهلیز فیروزآباد و راه‌های دسترسی به کیلومترهای مختلف مسیر؛ منبع:

Iran-Oston Consulting Engineers, 2026

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

از دیدگاه زمین‌شناسی، گستره مورد بررسی بخشی از رشته‌کوه البرز است. البرز یک کمربند چندکوهزادی است که تحت تأثیر کوهزادهای سیمیرید به سن تریاس پسین و آلپی به سن الیگومیوسن قرار گرفته است (Alavi, 1991). پوسته البرز حدود ۳۵ کیلومتر ضخامت دارد (Tatar, 2001) و شامل ردیف‌های ضخیمی از سنگ‌های پرکامبرین پسین تا عهد حاضر است. گانسر و

هوبر^{۱۱} (۱۹۶۲) البرز مرکزی را در برشی که از شمال به جنوب و در راستای جاده چالوس ترسیم شده است، به هفت پهنه ساختاری و چینه‌شناسی تقسیم‌بندی کرده‌اند (شکل ۳).



شکل ۳. تقسیم‌بندی چینه‌شناسی-ساختاری البرز؛ منبع: Gansser & Huber, 1962

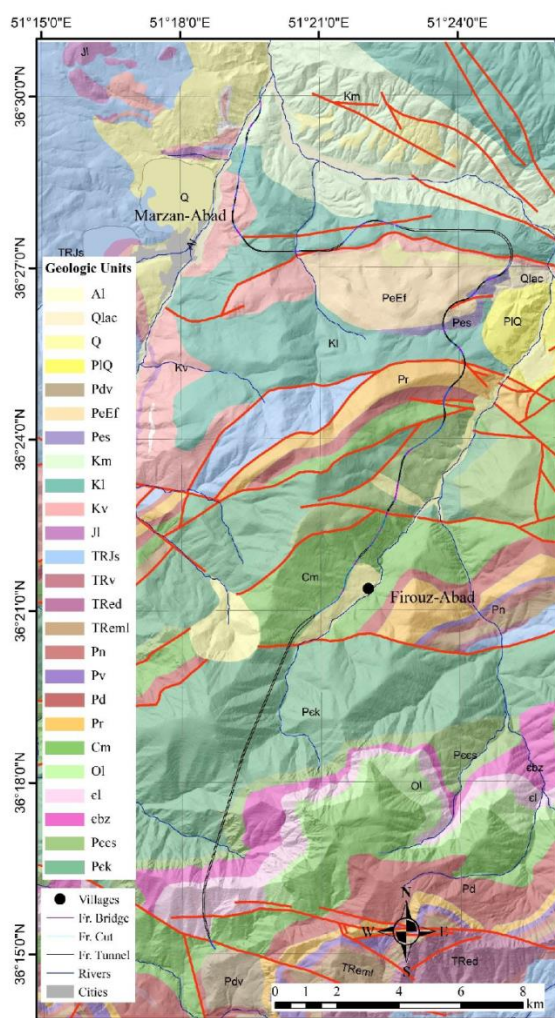
قسمت اعظم گستره موردبررسی در رشته پالتوزوئیک مرکزی قرار گرفته است که در شمال غرب آن توسط راندگی مجلار بر روی پهنه مزوزوئیک رانده شده است و به سمت جنوب در امتداد گسل راندگی دونا-سیاه‌بیشه بر روی پهنه مزوزوئیک مرکزی رانده شده است.

سازندهای زمین‌شناسی شناسایی‌شده در مسیر بخش مورد مطالعه از منطقه سوم آزادراه تهران-شمال اغلب متشکل از سنگ‌های رسوبی با ویژگی‌های سنگ‌شناسی متنوع و گوناگون هستند. سنگ‌های آهکی و دولومیتی با منشأ بیوشیمیایی و سپس سنگ‌های رسوبی آواری شامل تناوب‌های شیل، سیلتستون، ماسه‌سنگ و کنگلومرا در مسیر پروژه فراوان هستند. همچنین سنگ‌های ولکانیک و پیروکلاستیک در بخش‌هایی از مسیر پروژه برون‌زد دارند. تنوع سنگ‌شناختی مشاهده‌شده در مسیر پروژه، تنوع در ویژگی‌های مهندسی و ژئوتکنیکی را نیز به دنبال دارد. لیست سازندهای زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه و ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ به‌طور خلاصه ارائه شده است. شکل ۴ نیز توزیع سطحی این سازندها را در نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱. لیست سازندهای زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه

ردیف	سازند	نماد	سن	لیتولوژی غالب
۱	کهر	Pe _k	پالتوزوئیک	شیل‌های سیلتی، ماسه‌سنگ، لای‌سنگ، دولومیت و کوارتزیت
۲	سلطانیه	Pe _{cs}		دولومیت
۳	باروت	e _b		شیل همراه با آهک و دولومیت
۴	زاگون	e _z		شیل‌های آهک‌دار، ماسه‌سنگ آרקوزی، سیلتستون میکادار
۵	لالون	e _l	کامبرین پایینی تا میانی	ماسه‌سنگ آרקوزی و کوارتزار
۶	مبارک	Cm	کربونیفر پیشین	سنگ آهک و دولومیت
۷	درد	P _d	پرمین پایینی	ماسه‌سنگ، سیلتستون و شیل دارای تناوب‌های سنگ آهک مارنی و کنگلومرا
۸	روته	P _r	پرمین میانی	سنگ آهک‌های تیره‌رنگ چرت‌دار

ردیف	سازند	نماد	سن	لیتولوژی غالب
۹	نسن	P _n		سنگ آهک و شیل
۱۰	الیکا	TR _{ed}	تریاس	سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی
۱۱	شمشک	TR _{js}	تریاس	تناوب ماسه‌سنگ، لای سنگ و شیل
۱۲	لار	Jl	ژوراسیک	سنگ آهک و آهک دولومیتی
۱۳	واحد ولکانیکی	Kv	کرتاسه	آندزیت، بازالت، آذرآواری و آگلومرا
۱۴	واحد آهکی	Kl		آهک
۱۵	واحد آهکی-مارنی	Kml		آهک و مالستون
۱۶	واحد مارنی	Km		مارلستون
۱۷	واحد ماسه‌سنگی	Pes	پالتوسن	ماسه‌سنگ آهکی
۱۸	فجن	PeEf	پالتوسن-اٹوسن	کنگلومرای عمدتاً آهکی
۱۹	نهشته‌های عصر حاضر	-	کواترنر	رسوبات منفصل با اندازه رس تا شن همراه با بولدر و کوبل



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰؛ منبع: Iran-Oston Consulting Engineers, 2026

منطقه سوم پروژه آزادراه تهران-شمال، از دیدگاه زمین‌ساختی، در منطقه‌ای پویا قرار گرفته است. این ویژگی سبب شده است گسل‌های فعال متعددی در منطقه حضور داشته و سبب جابه‌جایی‌های بزرگی در سازندهای زمین‌شناسی منطقه گردند. این گسل‌های پویا پهنه‌های خردشده وسیعی را ایجاد کرده‌اند که عبور از آن‌ها، به‌ویژه در عملیات حفاری تونل‌ها، دشواری‌هایی را

برای پروژه ایجاد می‌کند.

از دیدگاه منطقه‌ای، گسل‌های اصلی شناخته‌شده را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته اول گسل‌های معکوس و راندگی دارای امتداد شمال شرق-جنوب غرب با شیبی به سمت جنوب شرق شامل گسل‌های سیاه‌بیشه، چیتن-دزبن، شمال مکارود و راندگی دشت‌نظیر هستند. دسته دوم گسل‌های با امتداد غرب، شمال غرب-شرق، جنوب شرق (با شیب زیاد نزدیک به قائم به سمت شمال) بوده که نمونه‌هایی از این دسته گسل‌ها شامل گسل دونا-سیاه‌بیشه، گسل ولی‌آباد، گسل شمال دزبن و گسل ولشت هستند. این دسته از گسل‌ها به‌جز گسل دونا-سیاه‌بیشه که مؤلفه امتدادلغز در آن تاکنون دیده نشده است با جابه‌جایی غالب امتدادلغز مشخص می‌شوند.

با نگاهی دقیق‌تر به مسیر آزادراه تهران-شمال، تعدادی از گسل‌هایی که با زاویه‌ای تقریباً قائم مسیر پروژه را قطع می‌کنند، قابل‌شناسایی هستند. تصویر ماهواره‌ای گسل‌های اصلی شناخته‌شده و موقعیت آن‌ها در منطقه مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پنج گسل اصلی در بخش‌های مختلف مسیر پروژه را قطع می‌کنند که از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی مواجهه با این گسل‌ها می‌تواند آثاری بر پروژه داشته باشند و پایداری ترانشه‌های بلند و تونل‌های عمیق را به خطر بیندازند. ویژگی‌های گسل‌های اصلی منطقه مورد مطالعه به‌طور خلاصه در جدول ۲ درج شده است.



شکل ۵. تصویر ماهواره‌ای گسل‌های اصلی شناخته‌شده در منطقه مورد مطالعه؛ منبع: Iran-Oston Consulting Engineers, 2026

جدول ۲. ویژگی‌های گسل‌های اصلی شناخته‌شده در منطقه مورد مطالعه

ردیف	گسل	سازوکار	عملکرد گسل	شیب و جهت شیب	طول (کیلومتر)	جابجایی (متر)	ضخامت زون آسیب (متر)	تقاطع با پروژه
۱	ولی‌آباد	امتدادلغز با مؤلفه معکوس	توالی‌های سازند کهر تا شمشک را بریده و به‌صورت راست‌بر جابه‌جا کرده است.	۷۰ تا ۸۹ درجه به‌سوی شمال شرق	۲۰	۴۰۰-۸۰۰		
۲	چیتن-دزبن	معکوس	راندن کهر و سلطانیه بر روی مبارک، درود و الیکا	۴۰ تا ۷۰ درجه به‌سوی جنوب شرق	۷۱			کیلومتر ۱۸+۳۴۸، تونل ۱
۳	سماء-مجلار	معکوس	راندگی بخشی از کهر و سلطانیه بر روی سنگ آهک‌های مبارک	۴۵ درجه به‌سوی شمال	۵۷		۲۰۰-۳۰۰	کیلومتر ۲۳+۹۳۴، محدوده پل‌های شماره ۶
۴	دشت‌نظیر	معکوس	راندگی سازند روته به سن پرمین بر روی واحدهای کرتاسه بالا	۵۰ تا ۶۰ درجه به‌سوی شمال	۱۱۰			کیلومتر ۳۰+۰۰۰، تونل ۶

تصاویری از رخنمون گسل‌های مورد بررسی در منطقه نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. این گسل‌ها باتوجه به طول زیادی که دارند و جابه‌جایی‌های زیادی که ایجاد نموده‌اند، در زمره گسل‌هایی هستند که انتظار می‌رود پهنه آسیب وسیعی داشته باشند و تقاطع با آن‌ها به‌ویژه در تونل‌های بلند و عمیق، مخاطره‌آمیز خواهد بود.



شکل ۶. تصاویری از رخنمون گسل‌های اصلی شناخته‌شده در منطقه مورد مطالعه؛ (الف) گسل ولی‌آباد با راستای شمال غرب-جنوب شرق از دامنه‌های شمالی روستای ولی‌آباد عبور می‌کند (نگاه به‌سوی شمال)، (ب) گسل چیتن-دزین در دره منجیر که سازند کهر (پرکامبرین) را بر روی سازند الیکا (تریاس) رانده است، (ج) گسل مرزن‌آباد که ولکانیک‌های کرتاسه را در کنار سنگ آهک کرتاسه قرار داده است، (د) گسل دشت نظیر-ناتر که در محدوده ۲۹ کیلومتر مسیر پروژه، سازند قدیمی تر روتنه (پرمین) را بر روی سنگ آهک‌های کرتاسه قرار

داده است (نگاه به‌سوی غرب)؛ منبع: Iran-Oston Consulting Engineers, 2026

لازم به ذکر است که علاوه بر گسل‌های اصلی معرفی شده در جدول ۲، گسل‌های کوچک و کم‌اهمیت‌تری نیز در منطقه قابل‌شناسایی هستند که دارای طول اندکی هستند. این گسل‌ها در مواردی سبب جابه‌جایی‌های کوچکی در توده‌سنگ‌های منطقه شده‌اند. برخی از آبراهه‌های فرعی و کوچک منطقه در مسیر همین گسل‌ها و شکستگی‌ها توسعه یافته‌اند و می‌توانند شاخص خوبی برای شناخت شکستگی‌ها و خرده گسل‌های منطقه نیز باشند. این گسل‌ها اغلب سبب ایجاد پهنه‌های خردشده‌ای در اطراف خود شده‌اند که حداکثر پهنای آن‌ها به ۱ تا ۳ متر می‌رسد.

معرفی چهارچوب رده‌بندی مخاطرات زمین‌شناسی پهنه‌های گسلی در تونل

باتوجه به اهمیت شناخت پهنه‌های گسلی در تونل‌سازی، در این بخش یک رده‌بندی پیشنهادی که توسط شایان و همکاران (۲۰۲۳، ۲۰۲۵) ارائه شده و به بررسی چالش‌های مرتبط با این پهنه‌ها می‌پردازد، معرفی گردیده و در بخش بعد برای رده‌بندی گسل‌های مسیر پیشنهادی پروژه در منطقه سوم آزادراه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رده‌بندی از پارامترهایی مانند لیتولوژی، کیفیت سنگ، فشار آب، روباره، هندسه تونل و ویژگی‌های گسل جهت تعیین رفتار توده‌سنگ‌های گسلی و برآورد احتمال وقوع مخاطرات زمین‌شناسی مرتبط با پهنه‌های گسلی در پروژه‌های تونل‌سازی استفاده شده است. علاوه بر این، تفاوت‌های رفتاری گسل‌های مختلف در تونل‌های گوناگون و وابستگی آن‌ها به شرایط خاص هر پروژه مورد تأکید قرار گرفته است. چهارچوب رده‌بندی پیشنهادی که در جدول ۳ ارائه شده است، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل و مدیریت مخاطرات زمین‌شناسی مرتبط با پهنه‌های گسلی در عملیات حفاری تونل عمل کند.

بخش (A) جدول ۳، زیررده‌های هفت پارامتر انتخابی برای این چهارچوب رده‌بندی (چهار پارامتر اصلی و سه پارامتر دیگر به‌عنوان ضرایب تصحیح) و بخش (B)، رتبه‌های اختصاص داده‌شده به زیررده‌های چهار پارامتر اصلی (شامل لیتولوژی، ارتفاع روباره، هد پیزومتریک و شاخص مقاومت زمین‌شناسی) برای محاسبه شاخص‌های خطر در تخمین پتانسیل وقوع مخاطرات زمین‌شناسی را نشان می‌دهد. رتبه‌های نسبی برای این زیررده‌ها به ترتیب ۰، ۲، ۵، ۸ و ۱۰ در نظر گرفته شده است. این مقادیر از ۰ (نشان‌دهنده تأثیر کم) تا ۱۰ (نشان‌دهنده تأثیر زیاد) با یک گرادین رنگی از آبی روشن تا بنفش تیره نمایش داده شده‌اند. امتیاز پارامترهای مرتبط با ضرایب تصحیح شامل اهمیت گسل‌ها، جهت‌گیری نسبی گسل نسبت به امتداد تونل و اندازه/قطر تونل (R_{FS} ، R_{RO} و R_{TD}) باتوجه به شدت اثرگذاری آن‌ها در وقوع مخاطرات زمین‌شناسی در پنج سطح مختلف در نظر گرفته شده است که به‌صورت R_{FS1} تا R_{FS5} ، R_{RO1} تا R_{RO5} و R_{TD1} تا R_{TD5} شناخته می‌شوند و با اعداد آبی، مورب و زیرخطدار نمایش داده شده‌اند.

در بخش (C) از جدول ۳، هر یک از مخاطرات زمین‌شناسی به‌صورت یک شاخص خطر معرفی و یک معادله برای ارزیابی بزرگا و احتمال وقوع آن ارائه شده است. روابط ارائه‌شده ۱ تا ۴ به ترتیب برای تخمین شاخص‌های خطر لهیدگی، آب ورودی به تونل، خطر ریزش و خطر سینه‌کار ناپایدار و بلوکی پیشنهاد شده‌اند. ضرایب متغیرها در این معادلات با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ 12 (RES)، همراه با قضاوت مهندسی، تعیین شده است.

$$(Sq-I) = (0.20 R_{LI} + 0.40 R_{OV} + 0.07 R_{PH} + 0.33 R_{GSI}) \times R_{FS} \times R_{RO} \times R_{TD} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$(Wi-I) = (0.25 R_{LI} + 0.50 R_{PH} + 0.25 R_{GSI}) \times R_{FS} \times R_{RO} \times R_{TD} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$(Cl-I) = (0.13 R_{LI} + 0.19 R_{OV} + 0.25 R_{PH} + 0.43 R_{GSI}) \times R_{FS} \times R_{RO} \times R_{TD} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$(Uf-I) = (0.15 R_{LI} + 0.23 R_{OV} + 0.08 R_{PH} + 0.54 R_{GSI}) \times R_{FS} \times R_{RO} \times R_{TD} \quad \text{رابطه (۴)}$$

درنهایت در بخش (D) از جدول ۳، از این چهار شاخص به‌عنوان معیاری برای رده‌بندی پهنه‌های گسلی استفاده شده است. در این رده‌بندی، پهنه‌های گسلی در پنج رده یا کلاس مختلف شامل (۱) گسل‌های بدون مسئله، (۲) گسل‌های کمی مسئله‌دار،

(۳) گسل‌های مسئله‌دار، (۴) گسل‌های بسیار مسئله‌دار، و (۵) گسل‌های به‌شدت مسئله‌دار یا بحرانی قرار می‌گیرند.

جدول ۳. چهارچوب طبقه‌بندی گسل‌ها از دیدگاه مخاطرات زمین‌شناسی در تونل‌ها؛ منبع: Shayan et al., 2025

(B)				(A)									
مقادیر زیررده‌ها برای هر یک از مخاطرات زمین‌شناسی اصلی				رتبه‌بندی زیررده‌های پارامترهای تأثیرگذار									
ورود آب	ریزش تونل	ناپایداری سینه‌کار	پدیده لهیدگی										
				(R _{LI1})	سنگ‌های کربناته		(۱) سنگ‌های رسوبی	زیررده‌ها	لیتولوژی (LI)				
				(R _{LI2})	ژیپس، انیدریت								
				(R _{LI3})	سنگ‌های آذریتی								
				(R _{LI4})	سنگ‌های آواری دانه‌درشت								
				(R _{LI5})	سنگ‌های پلوتونیک		(۲) سنگ‌های آذرین						
				(R _{LI6})	سنگ‌های آتشفشانی								
				(R _{LI7})	سنگ‌های پیروکلاستیکی		(۳) سنگ‌های پیروکلاستیکی						
				(R _{LI8})	سنگ‌های دگرگونی درجه پایین تا متوسط (متورق و سنگ مادر رسوبی)					(۴) سنگ‌های دگرگونی			
				(R _{LI9})	سنگ‌های دگرگونی درجه بالا (دارای شیسوزیته)								
				(R _{OV1})	(۱) > ۱۰۰ متر		زیررده‌ها	ارتفاع روباره و سطح تنش (OV)					
				(R _{OV2})	(۲) ۱۰۰-۲۵۰ متر								
				(R _{OV3})	(۳) ۲۵۰-۵۰۰ متر								
				(R _{OV4})	(۴) < ۵۰۰ متر								
				(R _{PH1})	(۱) بدون هد فشار آب		زیررده‌ها	هد پیرومتریک (PH)					
				(R _{PH2})	(۲) > ۵۰ متر								
				(R _{PH3})	(۳) ۵۰-۱۰۰ متر								
				(R _{PH4})	(۴) ۱۰۰-۲۰۰ متر								
				(R _{PH5})	(۵) < ۲۰۰ متر								
				(R _{GSI1})	(۱) > ۲۰		زیررده‌ها	شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)					
				(R _{GSI2})	(۲) ۲۰-۳۰								
				(R _{GSI3})	(۳) ۳۰-۴۰								
				(R _{GSI4})	(۴) ۴۰-۵۰								
				(R _{GSI5})	(۵) ۵۰-۶۰								
۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	(R _{FS1})	(۱) گسل‌های مهم		زیررده‌ها	اهمیت گسل (FS)					
۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	(R _{FS2})	(۲) گسل‌های اصلی								
۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	(R _{FS3})	(۳) گسل‌های متوسط								
۰/۱	۰/۳	۰/۳	۰/۵	(R _{FS4})	(۴) گسل‌های کوچک یا فرعی								
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۳	(R _{FS5})	(۵) گسل‌های بسیار کوچک								
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	(R _{RO1})	β: زاویه بین محور تونل و امتداد گسل	(۱) عمود (β = ۸۰-۹۰°)		زیررده‌ها	جهت‌گیری نسبی گسل (RO)				
۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	(R _{RO2})	(۲) تقریباً عمود (β = ۶۰-۸۰°)								
۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	(R _{RO3})	(۳) مایل (β = ۳۰-۶۰°)								
۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	(R _{RO4})	(۴) تقریباً موازی (β = ۱۰-۳۰°)								
۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۲۰	(R _{RO5})	(۵) موازی (β = ۰-۱۰°)								
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	(R _{TD1})	(۱) > ۵ متر		زیررده‌ها	اندازه/قطر تونل (TD)					
۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	(R _{TD2})	(۲) ۵-۷/۵								
۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	(R _{TD3})	(۳) ۷/۵-۱۰								
۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۱۰	(R _{TD4})	(۴) ۱۰-۱۲/۵								
۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	(R _{TD5})	(۵) < ۱۲/۵ متر								
این مقادیر برای محاسبه شاخص‌های زیر به کار می‌روند:										کدهای رنگی	امتیاز زیررده‌ها *	راهنما	
				N/A	۱۰	۸	۵	۲	۰				
رابطه (۱)				Sq-I = (0.20 R _{LI} + 0.40 R _{OV} + 0.07 R _{PH} + 0.33 R _{GSI}) × R _{FS} × R _{RO} × R _{TD}						شاخص پتانسیل لهیدگی		(C)	

رابطه (۲)	$Wi-I = (0.25 R_{LI} + 0.50 R_{PH} + 0.25 R_{GSI}) \times R_{FS} \times R_{RO}$ $\times R_{TD}$		شاخص پتانسیل ورود آب	شاخص های خطر	(D)
رابطه (۳)	$Cl-I = (0.13 R_{LI} + 0.19 R_{OV} + 0.25 R_{PH} + 0.43 R_{GSI})$ $\times R_{FS} \times R_{RO} \times R_{TD}$		شاخص پتانسیل ریزش		
رابطه (۴)	$Uf-I = (0.15 R_{LI} + 0.23 R_{OV} + 0.08 R_{PH} + 0.54 R_{GSI})$ $\times R_{FS} \times R_{RO} \times R_{TD}$		شاخص پتانسیل ناپایداری سینه‌کار		
V	IV	III	II	I	رده
>8	7-8	6-7	5-6	<5	شاخص خطر
به‌شدت مسئله‌دار/ بحرانی	بسیار مسئله‌دار	مسئله‌دار	کمی مسئله‌دار	بدون مسئله	شرح

برای استفاده از این روش طبقه‌بندی، مراحل زیر دنبال می‌شود:

- بخش (الف): بر اساس بازه‌های تغییرات ۷ پارامتر انتخابی، زیررده مربوط به پارامترها برای اولین مخاطره زمین‌شناسی (به‌عنوان مثال، ورود آب به داخل تونل) تعیین می‌شود.
- بخش (ب): مقادیر چهار پارامتر کلیدی (R_{OV} , R_{LI} , R_{PH} , R_{GSI}) با استفاده از کدهای رنگی (از آبی روشن تا بنفش تیره) و همچنین مقادیر سه ضریب تصحیح (R_{FS} , R_{RO} , R_{TD}) مطابق با [اعداد آبی، مورب و زیرخطدار](#) استخراج می‌شوند. این مقادیر مربوط به اولین مخاطره زمین‌شناسی انتخابی از ستون مربوطه برداشت می‌شوند.
- بخش (ج): معادله متناظر با اولین مخاطره زمین‌شناسی از این بخش انتخاب شده و شاخص خطر آن محاسبه می‌گردد.
- همین فرایند (مراحل ۲ و ۳) برای سه خطر زمین‌شناسی باقی‌مانده نیز تکرار می‌شود.
- بخش (د): رده هر مخاطره زمین‌شناسی بر اساس نتایج محاسبات تعیین شده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. مخاطراتی که در رده‌های بالاتر قرار می‌گیرند، پتانسیل وقوع بیشتری دارند.

در رده‌بندی پیشنهادی، شاخص‌های خطر قابل محاسبه برای پهنه‌های گسلی از مقدار ۰ تا ۱۰ متغیر هستند که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده افزایش احتمال وقوع مخاطرات در تونل است. بر اساس تجربیات پروژه‌های مختلف تونل‌سازی، گسل‌های بدون مسئله و کمی مسئله‌دار برای هر چهار مخاطره زمین‌شناسی، مقادیر شاخص زیر ۶ را نشان می‌دهند. در مقابل، گسل‌های به‌شدت مسئله‌دار یا بحرانی با حداقل یک مقدار شاخص خطر بیش از ۸ مشخص می‌شوند.

در جدول ۴ نیز، هر یک از رده‌های مختلف پهنه‌های گسلی در چهارچوب رده‌بندی پیشنهادی، همراه با مشکلات رایج زمین‌شناسی، تأخیرهای احتمالی و اقدامات موردنیاز شرح داده شده است. برای مثال در پهنه‌های گسلی بدون مسئله (رده I) هیچ تأخیری به دلیل شرایط زمین‌شناسی رخ نمی‌دهد. در مقابل، در پهنه‌های گسلی به‌شدت مسئله‌دار یا بحرانی (رده V) تأخیرهای طولانی‌مدت برای غلبه بر شرایط نامطلوب زمین‌شناسی و رخداد مخاطرات ژئوتکنیکی انتظار می‌رود. این پهنه‌ها باید از قبل شناسایی شده و تمامی تجهیزات و الزامات عبور از پهنه گسلی باید آماده باشد.

جدول ۴. شرح رده‌های مختلف طبقه‌بندی پیشنهادی پهنه‌های گسلی

رده شاخص خطر	شرح پهنه گسلی	مشکلات رایج زمین‌شناسی	تأخیرهای احتمالی	اقدامات
I	بدون مسئله	ریزش کم و قابل کنترل	هیچ تأخیری به دلیل شرایط زمین‌شناسی رخ نمی‌دهد.	شناسایی قبل از شروع حفاری و با تجربه بودن اپراتور دستگاه، نرخ نفوذ دستگاه را نیز می‌تواند تا حدودی افزایش دهد.
II	کمی مسئله‌دار	ورود آب خیلی کم، ریزش‌های قابل کنترل	هیچ تأخیری به دلیل شرایط زمین‌شناسی رخ نمی‌دهد، به‌ویژه زمانی که پیمانکار آمادگی لازم را داشته باشد.	شناسایی قبل از شروع حفاری و داشتن آمادگی برای عبور از این پهنه‌ها الزامی است.
III	مسئله‌دار	ورود آب کم، لهیدگی با شدت کمتر، ریزش‌های قابل کنترل	برخی تأخیرهای کوتاه‌مدت در عملیات حفاری انتظار می‌رود.	شناسایی قبل از شروع حفاری و داشتن آمادگی برای عبور از این پهنه‌ها الزامی است.
IV	بسیار مسئله‌دار	جریان آب زیاد، همگرایی و لهیدگی، ریزش	اگر پیمانکار تجربه کافی نداشته باشد، تأخیرهای طولانی‌مدت ممکن است رخ دهد.	این پهنه‌ها باید قبلاً شناسایی شده و تمامی تجهیزات و الزامات عبور از پهنه گسلی باید آماده باشد.
V	به‌شدت مسئله‌دار/ بحرانی	جریان آب عظیم، همگرایی و لهیدگی شدید، ریزش‌های بزرگ	تأخیرهای طولانی‌مدت برای غلبه بر شرایط نامطلوب زمین‌شناسی انتظار می‌رود.	شناسایی قبل از شروع حفاری و داشتن آمادگی برای عبور از این پهنه‌ها الزامی است.

رده‌بندی خطر گسل‌های شناسایی‌شده در مسیر پروژه

همان‌طور که اشاره شد، چهار گسل اصلی در مسیر منطقه سوم پروژه آزادراه حضور خواهند داشت. انتظار می‌رود این گسل‌ها زون آسیب وسیعی داشته باشند و عبور از آن‌ها به‌ویژه در تونل‌ها چالش‌برانگیز و پرمخاطره خواهد بود. از میان این چهار گسل، سه گسل چیتن-دزبن، دشت‌نظیر-ناتر و مرزن‌آباد به ترتیب از میان تونل‌های شماره ۱، ۶ و ۱۰ عبور می‌نمایند. در این بخش از مقاله، شرایط زون خردشده این سه گسل در تونل‌های ذکرشده، با استفاده از چهارچوب رده‌بندی که در بخش قبل معرفی گردید، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مراحل رده‌بندی هر یک از گسل‌ها و نتایج کلی در جدول ۵ ارائه شده است که در ادامه به شرح هر یک از آن‌ها پرداخته شده است.

عبور از پهنه گسلی چیتن-دزبن در مسیر تونل شماره ۱

تونل شماره ۱ به طول ۱۱ کیلومتر، بلندترین تونل طراحی‌شده برای مسیر مورد مطالعه است که پیش‌بینی می‌شود به‌صورت مکانیزه با استفاده از یک ماشین تونل‌بری با قطر بزرگ حفاری گردد. این تونل در حدود ۱۸+۳۵۰ کیلومتر با گسل چیتن-دزبن تقاطع خواهد داشت. صرف‌نظر از اتفاقات غیرمترقبه و غیرقابل‌پیش‌بینی در پروژه، می‌توان عبور از این گسل را مهم‌ترین چالش برای این پروژه در نظر گرفت. بنابراین، شناسایی دقیق این پهنه گسلی یکی از وظایف گروه طراحی در مراحل بعدی مطالعات خواهد بود.

گسل چیتن-دزبن با راستای شمال شرق-جنوب غرب، با شیب به‌سوی جنوب شرق و با طول حدود ۷۰ کیلومتر، از راندگی‌های اصلی منطقه است که سازندهای قدیمی مانند کهار و سلطانیه را بر روی سازندهای جوان‌تر مثل مبارک، درود و الیکا رانده است. در محدوده پروژه، این گسل از جنوب فیروزآباد گذر کرده و موجب راندگی سازند کهار (پرکامبرین) بر روی سنگ‌آهک‌های مبارک (کربونیفر) شده است.

در پروژه‌های تونل‌سازی، پهنه‌های گسلی توسعه‌یافته‌ای که سنگ‌های با نفوذپذیری کمتر را در کنار سنگ‌های نفوذپذیر با پتانسیل کارستی شدن قرار می‌دهند، از پرریسک‌ترین پهنه‌های گسلی محسوب می‌شوند. خردشدگی ناشی از گسلش باعث زهکش شدن و جریان راحت‌تر آب‌های زیرزمینی، در نتیجه توسعه تدریجی مناطق کارستی و تشکیل کانال‌های زیرزمینی انتقال آب می‌شود. هنگام عبور تونل‌ها از چنین پهنه‌هایی، هجوم آب زیرزمینی با دبی بالا، جریان ناگهانی گل‌ولای و ریزش دیواره‌ها و سقف تونل بسیار محتمل است.

برای رده‌بندی این گسل با استفاده از چهارچوب معرفی‌شده، کلیه پارامترهای مربوط به پهنه گسلی که در سیستم مذکور به‌عنوان پارامتر ورودی شناخته می‌شوند (شامل چهار پارامتر اصلی و سه ضریب تصحیح) برآورد و مقادیر رده‌ها و ضرایب تصحیح از جدول ۳ قرائت و با استفاده از روابط ۱ تا ۴ هر چهار شاخص خطر برای پهنه گسلی چیتن-دزبن در تونل شماره ۱ برآورد شد. نتایج این برآوردها و محاسبات در جدول ۵ درج شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این پهنه گسلی در ۲ شاخص (هجوم آب و ریزش تونل) دارای شرایط بحرانی بوده و در شاخص ناپایداری سینه‌کار مسئله‌دار پیش‌بینی می‌شود. همچنین پتانسیل وقوع لهیدگی هم تا حدی وجود دارد که در مقایسه با سایر مخاطرات باتوجه‌به روباره متوسط در این بخش از تونل از اهمیت کمتری برخوردار است. باتوجه‌به شاخص‌های به‌دست‌آمده، عبور از این گسل در تونل شماره ۱ پرچالش‌ترین بخش این پروژه از دیدگاه زمین‌شناسی محسوب می‌شود.

جدول ۵. محاسبه شاخص مخاطرات چهارگانه در محل تقاطع تونل‌ها با پهنه‌های گسلی

نام پهنه گسلی	مخاطرات زمین‌شناسی	پارامترهای مؤثر								شاخص مخاطرات زمین‌شناسی		
		لیتولوژی (LI)	ارتفاع روباره (OV) (متر)	پیزومتریک (PH) (متر)	مقاومت زمین‌شناسی (GSI)	اهمیت گسل (FS)	زاویه گسل نسبت به تونل (RO)	قطر تونل (TD) (متر)	شاخص مخاطره	مقدار	رده خطر	
گسلی با پهنه گسلی چین‌دزین	۱	شیل و ماسه‌سنگ در کنار آهک	۱۰۰-۲۵۰	۱۰۰-۲۰۰	۱۵	زیاد	$\beta_{60-80} =$	$>12/5$	-			
	۷	۱۰	۰	۸	۸	۰/۹	۱/۰۲	۱/۱۵	Wi-I	>8	بحرانی	
	۶	۵	۱۰	۸	۱۰	۰/۹	۱/۰۲	۱/۱۵	Cl-I	>8	بحرانی	
	۵	۱۰	۸	۲	۵	۰/۹	۱/۰۲	۱/۱۵	Uf-I	۶/۵	مسئله‌دار	
	۴	۵	۲	۸	۱۰	۰/۹	۱/۰۲	۱/۱۵	Sq-I	۵/۹	کمی مسئله‌دار	
گسلی دشت نظیر-ناتر	۱	سنگ آهک	<100	۵۰-۱۰۰	۱۵	زیاد	$\beta_{80-90} =$	$>12/5$	-			
	۷	۱۰	۰	۲	۸	۰/۹	۱/۰۰	۱/۱۵	Wi-I	۷/۲	بسیار مسئله‌دار	
	۶	۵	۱۰	۸	۱۰	۰/۹	۱/۰۰	۱/۱۵	Cl-I	>8	بحرانی	
	۵	۱۰	۱۰	۲	۵	۰/۹	۱/۰۰	۱/۱۵	Uf-I	۶/۹	مسئله‌دار	
	لهیدگی	۵	۰	۵	۱۰	۰/۹	۱/۰۰	۱/۱۵	Sq-I	۴/۸	بدون مسئله	
گسلی با پهنه گسلی مرزآباد	-	سنگ آهک	<100	<50	۱۵	متوسط	$\beta_{80-90} =$	$>12/5$	-			
	هجوم آب	۱۰	۰	۲	۸	۰/۸	۱/۰۰	۱/۱۵	Wi-I	۵/۱	کمی مسئله‌دار	
	ریزش کلی تونل	۵	۱۰	۵	۱۰	۰/۸	۱/۰۰	۱/۱۵	Cl-I	۷/۵	بسیار مسئله‌دار	
	ناپایداری سینه‌کار	۱۰	۱۰	۰	۵	۰/۸	۱/۰۰	۱/۱۵	Uf-I	۵/۹	کمی مسئله‌دار	
	لهیدگی	۵	۰	۲	۱۰	۰/۸	۱/۰۰	۱/۱۵	Sq-I	۴/۱	بدون مسئله	

عبور از پهنه گسلی دشت نظیر-ناتر در مسیر تونل شماره ۶

این گسل شاخه باختری گسل بزرگ و لرزه‌زای کجور است که در نقشه مرزن‌آباد با نام دشت نظیر-ناتر خوانده شده است. این گسل با طول حدود ۱۱۰ کیلومتر دارای راستای متغیر است. در محدوده پروژه مورد مطالعه راستای آن شرقی-غربی است و با زاویه تقریباً قائم تونل شماره ۶ را در حدود کیلومتر ۳۰ قطع می‌کند. سازوکار این گسله رانندگی و شیب صفحه گسل به‌سوی شمال است. این گسل موجب رانندگی سنگ‌آهک‌های سازند روته به سن پالئوزوئیک (پرمین) بر روی واحدهای سنگی کرتاسه بالا شده است. گسل دشت نظیر-ناتر و سماء-مجلار مرز جداکننده رشته پالئوزوئیک مرکزی (در جنوب) از زون مزوزوئیک شمالی (در شمال) هستند.

برای رده‌بندی این گسل نیز هفت پارامتر مربوط به پهنه گسلی (شامل چهار پارامتر اصلی و سه ضریب تصحیح) برآورد و مقادیر رده‌ها و ضرایب تصحیح از جدول ۳ قرائت و با استفاده از روابط ۱ تا ۴ هر چهار شاخص خطر زمین‌شناسی برای پهنه گسلی چین-دزین در مسیر تونل شماره ۱ برآورد گردید. نتایج این برآوردها و محاسبات در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این پهنه گسلی در ۲ شاخص هجوم آب و ریزش کلی تونل، به ترتیب دارای شرایط بسیار مسئله‌دار و بحرانی بوده و در شاخص ناپایداری سینه کار مسئله‌دار پیش‌بینی می‌شود. همچنین پتانسیل وقوع لهیدگی باتوجه‌به

روباره کم در این قسمت از تونل وجود ندارد. بنابراین، در مجموع عبور از این پهنه گسلی در مسیر تونل شماره ۶ چالشی جدی برای پروژه محسوب می‌شود.

عبور از پهنه گسلی مرزن‌آباد در مسیر تونل شماره ۱۰

گسل مرزن‌آباد با طول ۲۴ کیلومتر، با راستای شرقی-غربی امتداد یافته است. این گسل مسیر پروژه را در ابتدای تونل شماره ۱۰ و در ۳۵+۴۵۰ متر قطع می‌کند و در بیشتر نقاط به موازات تونل‌های شماره ۱۰، ۱۱ و ۱۲ امتداد دارد. گسل مرزن‌آباد با سازوکار معکوس، موجب راندگی سنگ‌های آتشفشانی کرتاسه بر روی سنگ آهک‌های کرتاسه بالا شده و شیب صفحه آن به‌سوی جنوب است. سازوکار این گسله در نقشه زمین‌شناسی مرزن‌آباد معکوس دانسته شده است. اما برخی از اندازه‌گیری‌ها در برخی نقاط (جاده آسفalte نیرس) سازوکار عادی نشان می‌دهد که به رژیم حاکم بر منطقه تطابق ندارد. در طول گسله واحد ولکانیکی در همه‌جا دیده نمی‌شود و توسط کنگلومرای فجن (پالتوسن-ائوسن) پوشانده شده است.

برای رده‌بندی این گسل نیز کلیه پارامترهای مربوط به پهنه گسلی (شامل چهار پارامتر اصلی و سه ضریب تصحیح) برآورد و مقادیر رده‌ها و ضرایب تصحیح از جدول ۳ قرائت و با استفاده از روابط ۱ تا ۴ هر چهار شاخص خطر برای پهنه گسلی مرزن‌آباد در تونل شماره ۱ برآورد گردید. نتایج این برآوردها و محاسبات در جدول ۵ ارائه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود این پهنه گسلی در شاخص ریزش کلی تونل دارای شرایط بحرانی بوده و در دو شاخص آب ورودی به تونل و ناپایداری سینه‌کار کمی مسئله‌دار پیش‌بینی می‌شود. همچنین پتانسیل وقوع لهیدگی باتوجه‌به روباره کم در این بخش از تونل وجود ندارد. بنابراین، در مجموع عبور از این پهنه گسلی در تونل شماره ۱۰ چالشی جدی فقط از دیدگاه مخاطره ناپایداری‌های جداره تونل محسوب می‌شود.

بحث

در این مقاله با به‌کارگیری چهارچوب رده‌بندی پیشنهادی گسل‌ها در سه پهنه گسلی مهم در مسیر پروژه‌های تونلی منطقه سوم آزادراه تهران-شمال شامل گسل‌های چیتن-دزین در مسیر تونل شماره ۱، دشت‌نظیر-ناتر در مسیر تونل شماره ۶ و مرزن‌آباد در مسیر تونل شماره ۱۰ از دیدگاه وقوع مخاطرات زمین‌شناسی در این زون‌ها ارزیابی شده‌اند. این چهارچوب تأثیر هفت پارامتر شامل لیتولوژی (LI)، ارتفاع روباره تونل (OV)، هد پیزومتری (PH)، شاخص مقاومت زمین‌شناس (GSI)، اهمیت گسل‌ها (FS)، جهت‌گیری نسبی گسل نسبت به امتداد تونل (RO)، و اندازه/قطر تونل (TD) بر روی چهار مخاطره اصلی زمین‌شناسی شامل ورود آب به داخل تونل (Wi)، ریزش کلی تونل (CI)، ناپایداری سینه‌کار تونل (Uf) و لهیدگی (Sq) به‌طور جداگانه با احتمال وقوع در زون‌های گسلی ارزیابی می‌کند. این چهارچوب بر اساس تجربیات و مستندات به‌دست‌آمده از مطالعه ویژگی‌ها و پدیده‌های مخاطره‌آمیز که در تعداد زیادی از زون‌های گسلی در امتداد تونل‌های بلند ایران رخ داده است، توسعه داده شده است و به‌عنوان رویکردی ارزشمند به پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار زون‌های گسلی در پروژه‌های مختلف تونل‌سازی می‌پردازد. بر اساس نتایج این مطالعه، پهنه گسلی چیتن-دزین در تونل شماره ۱ از نظر مخاطرات هجوم آب و ریزش کلی تونل در رده گسل‌های بحرانی، شاخص ناپایداری سینه‌کار در رده مسئله‌دار و پدیده لهیدگی کمی مسئله‌دار ارزیابی شده است که این گسل را به‌عنوان پرچالش‌ترین بخش این پروژه از دیدگاه رخداد مخاطرات زمین‌شناسی پیش‌بینی می‌کند. در مورد گسل دشت‌نظیر-ناتر در تونل شماره ۶ نیز، شاخص مخاطره هجوم آب در رده بسیار مسئله‌دار، شاخص مخاطره ریزش کلی تونل در رده بحرانی و شاخص مخاطره ناپایداری سینه‌کار در رده مسئله‌دار طبقه‌بندی شده است. بر این اساس عبور از این پهنه گسلی چالشی جدی برای پروژه پیش‌بینی شده است. همچنین نتایج مطالعات در مورد پهنه گسلی مرزن‌آباد در مسیر تونل شماره ۱۰ نشان داد که این گسل از نظر مخاطره ریزش کلی تونل در رده بحرانی و از نظر دو مخاطره شاخص آب ورودی و ناپایداری سینه‌کار تونل کمی مسئله‌دار پیش‌بینی شده است. در نتیجه، عبور از این پهنه گسلی در تونل ۱۰ چالشی جدی فقط از دیدگاه مخاطره ناپایداری‌های جداره تونل ارزیابی می‌شود. لازم به ذکر است در دو پهنه گسلی دشت‌نظیر-ناتر و مرزن‌آباد وقوع مخاطره لهیدگی باتوجه‌به ارتفاع

روباره کم در این بخش‌ها وجود ندارد. باتوجه به قرارگیری پهنه‌های گسلی مورد مطالعه در رده گسل‌های بحرانی و مسئله‌دار شناسایی دقیق این زون‌ها و در نظر گرفتن تمهیدات لازم در مواجهه با مناطق ضروری است.

نتیجه‌گیری

باتوجه به اهمیت شناسایی پهنه‌های گسلی در پروژه‌های تونل‌سازی، شناسایی دقیق این مناطق می‌تواند نقش مؤثری در کاهش ریسک و مخاطرات زمین‌شناسی، تأخیرات اجرایی و هزینه‌های پروژه ایفا کند. هدف این مطالعه، شناسایی و پیش‌بینی مخاطرات ناشی از حضور گسل‌ها در مسیر تونل‌های منطقه سوم آزادراه تهران-شمال است. در این مقاله با به‌کارگیری چهارچوب رده‌بندی پیشنهادی از دیدگاه مخاطرات زمین‌شناسی در تونل‌ها به بررسی جنبه‌های کلیدی ارزیابی زمین‌شناسی، مخاطرات و چالش‌های حفاری مرتبط با این نواحی در پروژه مورد مطالعه پرداخته شده است. به این منظور، پروژه‌های تونلی شماره ۱، ۶ و ۱۰ در مسیر پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و گسل‌های اصلی مسیر آن‌ها شناسایی شده‌اند تا مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی مرتبط با این بخش‌ها مشخص شوند. نتایج نشان می‌دهد که هر یک از گسل‌های مورد مطالعه، نشان‌دهنده چالش‌های مختلف تونل‌سازی در طول عملیات حفاری این تونل‌ها هستند و در رده‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین چالش‌های زمین‌شناسی پیش‌بینی‌شده در زون‌های گسلی مورد بررسی در مسیر این تونل‌ها شامل هجوم آب به داخل تونل، ناپایداری سینه‌کار و ریزش کلی تونل ارزیابی شده است. وقوع پدیده لهیدگی در این زون‌ها به دلیل ارتفاع کم روباره در این بخش‌ها به‌صورت مسئله‌دار پیش‌بینی نمی‌شود. بر اساس این طبقه‌بندی، زون‌های گسلی مورد بررسی در رده گسل‌های به‌شدت مسئله‌دار/بحرانی و بسیار مسئله‌دار قرار گرفته‌اند که تأخیرهای طولانی‌مدت برای غلبه بر شرایط نامطلوب زمین‌شناسی در این نواحی انتظار می‌رود. بنابراین شناسایی دقیق این پهنه‌ها، قبل از اجرا و شروع عملیات حفاری و داشتن آمادگی لازم و تجهیزات برای عبور از این زون‌ها الزامی است.

References

- Anagnostou, G., & Kovári, K. (2005). Tunnelling through geological fault zones. Proceedings of International symposium on design, construction and operation of long tunnels.
- Alavi, M. (1991). Sedimentary and Structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geol. Soc. Am. Bulletin.*, vol. 103, 983-992.
- Brosch, F.-J., Kurz, W., & Klima, K. (2006). Definition and Characterisation of Faults and Fault Rocks. *Felsbau*, 24(5), 13-20.
- Childs, C., Nicol, A., Walsh, J. J., & Watterson, J. (1996). Growth of vertically segmented normal faults. *Journal of Structural Geology*, 18(12), 1389-1397.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511777806>
- Fossen, H. (2020). Fault classification, fault growth and displacement. In *Regional geology and tectonics* (pp. 119-147). Elsevier.
- Gansser, A., Huber, H. (1962). Geological observation in the central Elburz, Iran. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 42, 583-630.
- Goodarzi, S., Hassanpour, J., Yagiz, S., & Rostami, J. (2021). Predicting TBM performance in soft sedimentary rocks, case study of Zagros mountains water tunnel projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 109, 103705. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103705>
- Hassanpour, J., Firouzei, Y., & Hajipour, G. (2021). Actual performance analysis of a double shield TBM through sedimentary and low to medium grade metamorphic rocks of Ghomrood water conveyance tunnel project (lots 3 and 4). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2), 1419-1432. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01947-z>
- Hassanpour, J., Khoshkar, A. S., Farasani, M. G., & Hashemnejad, A. (2022). Investigating the relationships between rock mass classification systems based on data from mechanized tunneling projects in Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(4), 147.
- Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., & Bruland, A. (2009). Developing new equations for TBM performance prediction in carbonate-argillaceous rocks: a case history of Nowsood water conveyance tunnel. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 4(4), 287-297. <https://doi.org/10.1080/17486020903174303>
- Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., Bruland, A., & Tavakoli, H. (2010). TBM performance analysis in pyroclastic rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43, 427-445. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0060-2>
- Hassanpour, J., Rostami, J., & Zhao, J. (2011). A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(5), 595-603. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.04.004>
- Iran-Oston Consulting Engineers (2026). Engineering geological studies of third zone of Tehran-Shomal Freeway. Unpublished, In Persian.
- Nelson, R. A. (1985). *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs* (Vol. 1). Gulf Professional Publishing.
- Shayan, F., Uromeie, A., & Hassanpour, J. (2023). Classification of fault zones in mechanized tunneling projects. In *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World* (pp. 2245-2252). CRC Press. World Tunnel Congress (WTC2023), Athens, Greece.
- Shayan, F., Uromeihy, A., & Hassanpour, J. (2025). Classification framework for engineering geological challenges in fault zones during TBM tunneling: Insights from mechanized projects in Iran. *Engineering Geology*, 108382. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108382>
- Tatar, M. (2001). *Etude seismotectonique de deluxe zones de collision continentale: le Zagros Central el l'Alborz (Iran)*. Ph.D. Thesis, University de Joseph Fourier.

DOI: <https://doi.org/10.22034/1.3.1>