Incidents and Disasters Resilience

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

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

Jafar Hassanpour[1]✉, **Fatemeh Shayan**[2], and **Ali Uromeihy**[3]

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 Hazaards,
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, DashteNazir- Nater, Chiten- Dozbon and MarzanAbad faults show that these faults will considered as serious challenges for tunnels through them including tunnels no. 1 , 6 and 10. Among these faults, Chiten- Dozbon fault is 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.

© Author(s) retain the copyright.

Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).

تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir

پیش‌بینی مخاطرات ناشی از حضور گسل‌ها در مسیر تونل‌ها؛ مطالعه موردی: تونل‌های منطقه سوم آزادراه تهران– شمال

جعفر حسن‌پور[۱]✉، فاطمه شایان[۲]، علی ارومیه‌ای[۳]

۱. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی و زمین‌ساخت، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hassanpour@ut.ac.ir

۲. دانش‌آموخته دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: f.shayan@modares.ac.ir

۳. استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: uromeiea@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

کلیدواژه‌ها:
پهنه گسلی،
رده‌بندی گسل‌ها،
مخاطرات زمین‌شناسی،
تونل‌سازی.

چکیده

هدف: احداث تونل‌های بلند و عمیق در ایران در نواحی کوهستانی همراه با فعالیت‌های تکتونیکی، به دلیل وجود ساختارهای زمین‌ساختی پیچیده نظیر گسل‌ها با چالش‌های زمین‌شناسی و دشواری‌های حفاری همراه است. از سوی دیگر، بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی سنگ‌های گسلی به دلیل دشواری نمونه‌برداری و ماهیت ناهمگن آن‌ها بسیار چالش‌برانگیز است. ازاین‌رو، شناسایی گسل‌ها و پیش‌بینی رفتار آن‌ها در فرایند حفاری تونل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پیش‌بینی دقیق این رفتارها می‌تواند در جلوگیری از تأخیرهای طولانی‌مدت و افزایش زمان و هزینه بسیار مؤثر باشد.

روش پژوهش: در این مقاله سعی شده است تا با شناسایی مهم‌ترین گسل‌ها در مسیر پروژه‌های تونلی منطقه سوم آزادراه تهران– شمال و با بهره‌گیری از چهارچوب رده‌بندی مخاطرات زمین‌شناسی پهنه‌های گسلی در تونل‌ها، طبقه‌بندی گسل‌ها انجام گردد. در این رده‌بندی، احتمال وقوع مخاطرات زمین‌شناسی اصلی مرتبط با پهنه‌های گسلی در پروژه‌های تونل‌سازی شامل هجوم آب، ریزش کلی تونل، ناپایداری سینه‌کار و لهیدگی بر اساس پارامترهای مؤثر نظیر لیتولوژی، کیفیت سنگ، فشار آب، ارتفاع روباره، قطر تونل، اهمیت گسل و جهت‌گیری نسبی گسل ارزیابی می‌شود که به تفاوت‌های رفتاری هر یک از گسل‌ها در تونل‌های مختلف و وابستگی آن‌ها به شرایط زمین‌شناسی و فنی خاص هر پروژه اشاره دارد.

یافته‌ها: شاخص‌های خطر زمین‌شناسی برآوردشده در این پژوهش برای هر یک از گسل‌های شناسایی‌شده مهم در پروژه شامل گسل‌های چیتن–دزبن، دشت‌نظیر–ناتر و مرزن‌آباد نشان می‌دهد که این گسل‌ها چالش‌های جدی برای تونل‌های عبوری از آن‌ها شامل تونل‌های شماره ۱، ۶ و ۱۰ محسوب خواهند شد. در میان این گسل‌ها، گسل چیتن–دزبن به‌عنوان چالش‌برانگیزترین زون گسلی شناسایی شده است.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج ارزیابی‌ها و پیش‌بینی‌ها، گسل‌های موردمطالعه در رده گسل‌های بحرانی و بسیار بحرانی طبقه‌بندی می‌شوند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود تمهیدات لازم برای عبور از این پهنه‌های گسلی بحرانی در نظر گرفته شود.

استناد: حسن‌پور؛ جعفر، شایان؛ فاطمه، ارومیه‌ای؛ علی. (۱۴۰۴). پیش‌بینی مخاطرات ناشی از حضور گسل‌ها در مسیر تونل‌ها؛ مطالعه موردی: تونل‌های منطقه سوم آزادراه تهران– شمال. *تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح*، ۱ (۳)، ۳–۱۸.

CC BY NC

© 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. به‌طورکلی، 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 ازجمله 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 به‌طورکلی 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[1] و توده‌سنگ‌های اطراف آنکه تحت تغییر شکل‌های شکننده قرار گرفته و به‌عنوان زون آسیب گسل[2] شناخته می‌شود، از یکدیگر متمایز شوند. زون کشش[3]، 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).

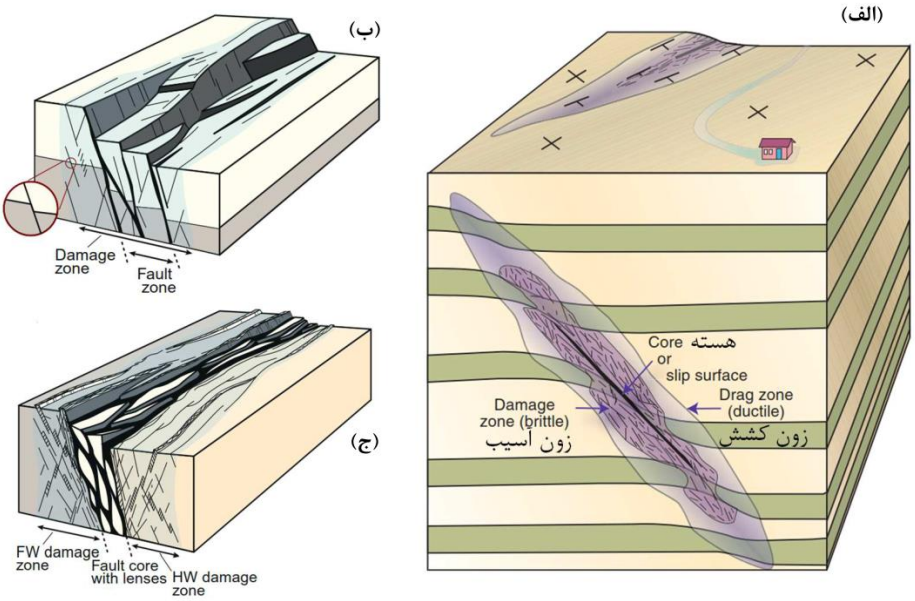
هسته یک گسل ناحیه‌ای است که حرکت لغزش اصلی در آن اتفاق می‌افتد و با شکستگی شدید و جابه‌جایی برشی مشخص می‌شود. هسته گسل ممکن است از یک سطح لغزش ساده با یک زون کاتاکلاستیک[4] با ضخامت کمتر از یک میلی‌متر تا یک منطقه شامل چندین سطح لغزش، یا حتی یک ناحیه به‌شدت برش‌خورده با پهنایی تا چندین متر متغیر باشد که تنها بخش‌هایی محدود از ساختارهای اولیه سنگ ممکن است حفظ شده باشند. به‌طورکلی، میزان ضخامت هسته گسل‌ها با افزایش مقدار افت گسلی[5] ارتباط مستقیم دارد. بااین‌حال، 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[6] و همچنین در هر دو طرف هسته گسل گسترش می‌یابد. ساختارهای رایج در زون‌های آسیب گسلی شامل باندهای تغییر شکل[7] شکستگی‌های برشی[8]، شکستگی‌های کششی[9] و استیلولیت‌ها[10] 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 درنتیجه پایداری تونل دارد. ازاین‌رو، 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 قابل‌توجه 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 ازجمله 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 قابل‌توجهی 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).

10. Stylolites

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، حدفاصل 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 موردبررسی قرار می‌گیرد. مسیر حدود ۸ کیلومتر ابتدایی منطقه سوم تعیین تکلیف شده و باقی‌مانده مسیر در مرحله مطالعات برای انتخاب مسیر برتر است.

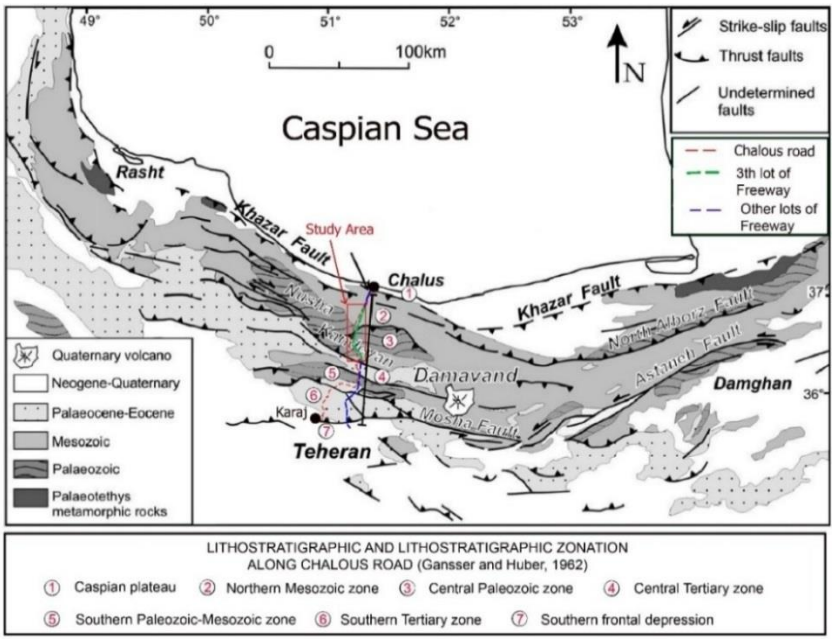
مسیر پیشنهادی در دره فیروزآباد به طول کل حدود ۵۰ کیلومتر، بعد از ورود به دره ازطریق تونل شماره ۱ از دامنه غربی دره فیروزآباد ادامه مسیر می‌دهد و از کیلومتر ۳۵ بر روی دامنه شمالی رودخانه دشت‌نظیر قرار می‌گیرد. سپس، از کیلومتر حدود ۴۴ وارد دره چالوس می‌شود. بخش موردنظر از این مسیر شامل ۱۸ تونل (به‌صورت دوقلو در باندهای چپ و راست) با طول حداقل ۱۰۰ و حداکثر ۱۱۱۴۷ متر و با مجموع طول حدود ۲۷۵۰۰ متر (حدود۵۵۰۰۰ 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 موردمطالعه

از دیدگاه زمین‌شناسی، گستره موردبررسی بخشی از رشته‌کوه البرز است. البرز یک کمربند چندکوهزادی است که تحت تأثیر کوهزادهای سیمرید 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[11] (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 پالئوزوئیک 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.

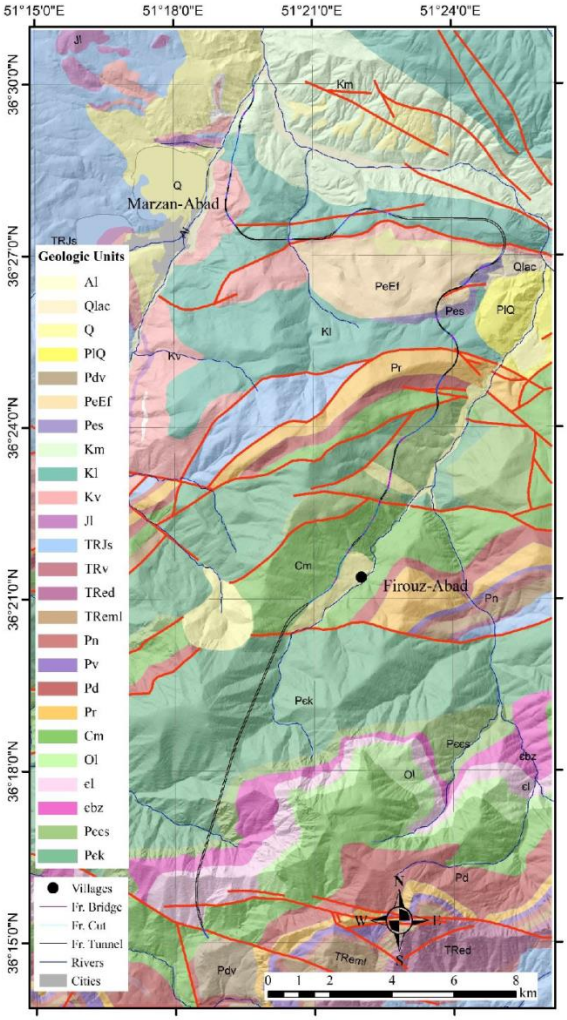
سازندهای زمین‌شناسی شناسایی‌شده در مسیر بخش موردمطالعه از منطقه سوم آزادراه تهران-شمال اغلب متشکل از سنگ‌های رسوبی با ویژگی‌های سنگ‌شناسی متنوع و گوناگون هستند. سنگ‌های آهکی و دولومیتی با منشأ بیوشیمیایی و سپس سنگ‌های رسوبی آواری شامل تناوب‌های شیل، سیلتستون، ماسه‌سنگ و کنگلومرا در مسیر پروژه فراوان 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 موردمطالعه و ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ به‌طور خلاصه ارائه شده است. شکل ۴ نیز توزیع سطحی این سازندها را در نقشه زمین‌شناسی منطقه موردمطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱. لیست سازندهای زمین‌شناسی در منطقه موردمطالعه

ردیف	سازند	نماد	سن	لیتولوژی غالب
۱	کهر	$P\epsilon_k$	پالئوزوئیک	شیل‌های سیلتی، ماسه‌سنگ، لای‌سنگ، دولومیت و کوارتزیت
۲	سلطانیه	$P\epsilon\epsilon s$		دولومیت
۳	باروت	ϵ_b		شیل همراه با آهک و دولومیت
۴	زاگون	ϵ_z		شیل‌های آهک‌دار، ماسه‌سنگ آرکوزی، سیلتستون میکادار
۵	لالون	ϵ_l	کامبرین پایینی تا میانی	ماسه‌سنگ آرکوزی و کوارتزدار
۶	مبارک	Cm	کربونیفر پیشین	سنگ آهک و دولومیت
۷	درود	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

11. Gansser & Huber

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	TRjs	تریاس	تناوب ماسه‌سنگ، لای‌سنگ 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	پالئوسن	ماسه‌سنگ آهکی
۱۸	فجن	PeEf	پالئوسن–ائوسن	کنگلومرای عمدتاً آهکی
۱۹	نهشته‌های عصر حاضر	–	کواترنر	رسوبات منفصل با اندازه رس تا شن همراه با بولدر و کوبل



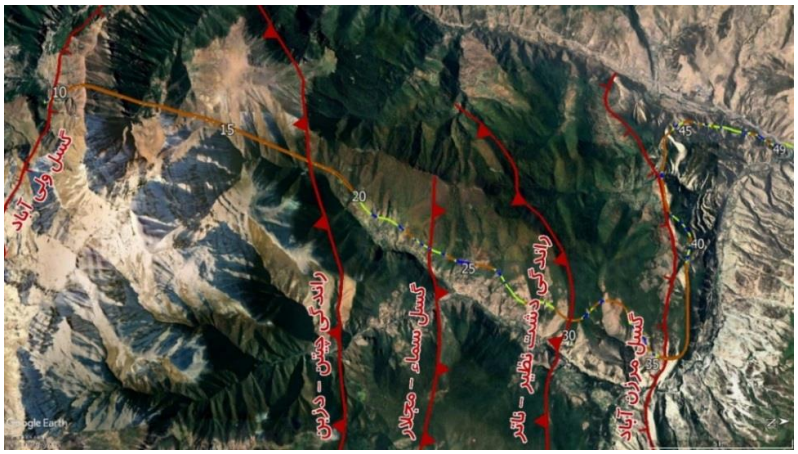
شکل ٤. نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰؛ منبع: Iran-Oston Consulting Engineers, 2026

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 شناخته شده و موقعیت آن‌ها در منطقه موردمطالعه 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 موردمطالعه به‌طور خلاصه در جدول ۲ درج شده است.



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

جدول ۲. ویژگی‌های گسل‌های اصلی شناخته‌شده در منطقه موردمطالعه

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 ۷۰درجه 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	دشت نظیر–ناتر	معکوس	راندگی سازند روته به سن پرمین بر روی واحدهای کرتاسه بالا	۵۰ تا ۶۰ درجه به‌سوی شمال	۱۱۰			کیلومتر ۳۰+۰۰، تونل ۶

تصاویری از رخنمون گسل‌های موردبررسی در منطقه نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. این گسل‌ها باتوجه‌به 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 ٦. تصاویری از رخنمون گسل‌های اصلی شناخته‌شده در منطقه موردمطالعه؛ الف) گسل ولی‌آباد با راستای شمال غرب-جنوب شرق از دامنه‌های شمالی روستای ولی‌آباد عبور می‌کند (نگاه به‌سوی شمال)، ب) گسل چیتن-دزبن 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 کیلومتر ۲۹ مسیر پروژه، سازند قدیمی‌تر روته (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 معرفی‌شده 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

باتوجه‌به 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 مورداستفاده 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 گرادیان 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}) باتوجه‌به 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 (RES)[۱۲]، همراه با قضاوت مهندسی، تعیین شده است.

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

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

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

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

12. Rock Engineering System

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

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

ی خطر	شاخص پتانسیل ورود آب	$Wi\text{-}I = (0.25\,R_{LI} + 0.50\,R_{PH} + 0.25\,R_{GSI}) \times R_{FS} \times R_{RO} \times R_{TD}$	رابطه (۲)
	شاخص پتانسیل ریزش	$Cl\text{-}I = (0.13\,R_{LI} + 0.19\,R_{OV} + 0.25\,R_{PH} + 0.43\,R_{GSI}) \times R_{FS} \times R_{RO} \times R_{TD}$	رابطه (۳)
	شاخص پتانسیل ناپایداری سینه‌کار	$Uf\text{-}I = (0.15\,R_{LI} + 0.23\,R_{OV} + 0.08\,R_{PH} + 0.54\,R_{GSI}) \times R_{FS} \times R_{RO} \times R_{TD}$	رابطه (۴)

(D)	رده‌های خطر	رده	I	II	III	IV	V
		شاخص خطر	<۵	۵–۶	۶–۷	۷–۸	>۸
		شرح	بدون مسئله	کمی مسئله‌دار	مسئله‌دار	بسیار مسئله‌دار	به‌شدت مسئله‌دار/ بحرانی

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

۱. بخش (الف): بر اساس بازه‌های تغییرات ۷ پارامتر انتخابی، زیررده مربوط به پارامترها برای اولین مخاطره زمین‌شناسی (به‌عنوان‌مثال، ورود آب به داخل تونل) تعیین می‌شود.

۲. 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.

۳. بخش (ج): معادله متناظر با اولین مخاطره زمین‌شناسی از این بخش انتخاب شده و شاخص خطر آن محاسبه می‌گردد.

۴. همین فرایند (مراحل ۲ و ۳) برای سه خطر زمین‌شناسی باقی‌مانده نیز تکرار می‌شود.

۵. 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 قابل‌محاسبه 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 ٤. 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 قابل‌کنترل	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 قابل‌کنترل	هیچ تأخیری به دلیل شرایط زمین‌شناسی رخ نمی‌دهد، به‌ویژه زمانی که پیمانکار آمادگی لازم را داشته باشد.	
III	مسئله‌دار	ورود آب کم، لهیدگی با شدت کمتر، ریزش‌های قابل‌کنترل	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.	

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 موردمطالعه است که پیش‌بینی می‌شود به‌صورت مکانیزه با استفاده از یک ماشین تونلبری با قطر بزرگ حفاری گردد. این تونل در حدود کیلومتر ۳۵۰+۱۸ 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، درنتیجه 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)	هد پیزومتریک (PH) (متر)	شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)	اهمیت گسل (FS)	زاویه گسل نسبت به تونل (RO)	قطر تونل (TD) (متر)	شاخص مخاطره	مقدار	رده خطر
تقاطع تونل ۱ با پهنه گسلی چیتن–دزبن	–	شیل و ماسه‌سنگ در کنار آهک	۱۰۰–۲۵۰	۱۰۰–۲۰۰	۱۵	زیاد	β ۶۰–۸۰° =	>۱۲/۵	–		
	هجوم آب	۱۰	۰	۸	۸	۰/۹	۱/۰۲	۱/۱۵	Wi-I	>۸	بحرانی
	ریزش کلی تونل	۵	۱۰	۸	۱۰	۰/۹	۱/۰۲	۱/۱۵	Cl-I	>۸	بحرانی
	ناپایداری سینه‌کار	۱۰	۸	۲	۵	۰/۹	۱/۰۲	۱/۱۵	Uf-I	۶/۵	مسئله‌دار
	لهیدگی	۵	۲	۸	۱۰	۰/۹	۱/۰۲	۱/۱۵	Sq-I	۵/۹	کمی مسئله‌دار
تقاطع تونل ۶ با پهنه گسلی دشت نظیر–ناتر	–	سنگ آهک	<۱۰۰	۵۰–۱۰۰	۱۵	زیاد	β ۸۰–۹۰° =	>۱۲/۵	–	–	–
	هجوم آب	۱۰	۰	۲	۸	۰/۹	۱/۰۰	۱/۱۵	Wi-I	۷/۲	بسیار مسئله‌دار
	ریزش کلی تونل	۵	۱۰	۸	۱۰	۰/۹	۱/۰۰	۱/۱۵	Cl-I	>۸	بحرانی
	ناپایداری سینه‌کار	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
تقاطع تونل ۱۰ با پهنه گسلی مرزن‌آباد	–	سنگ آهک	<۱۰۰	<۵۰	۱۵	متوسط	β ۸۰–۹۰° =	>۱۲/۵	–	–	–
	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 دشت‌نظیر–ناتر در مسیر تونل شماره ٦

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 موردمطالعه راستای آن شرقی–غربی است و با زاویه تقریباً قائم تونل شماره ۶ را در حدود کیلومتر ۳۰ قطع می‌کند. سازوکار این گسله راندگی و شیب صفحه گسل به‌سوی شمال است. این گسل موجب راندگی سنگ‌آهک‌های سازند روته به سن پالئوزوئیک (پرمین) بر روی واحدهای سنگی کرتاسه بالا شده است. گسل دشت‌نظیر–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 چیتن–دزبن 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 سینه‌کار مسئله‌دار پیش‌بینی می‌شود. همچنین پتانسیل وقوع لهیدگی باتوجه‌به

روباره کم در این قسمت از تونل وجود ندارد. بنابراین، درمجموع 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 کیلومتر۴۵۰+۳۵ قطع می‌کند و در بیشتر نقاط به‌موازات 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 آسفالته 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 (پالئوسن–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، درمجموع 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–دزبن 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 پیزومتریک *(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 *(Cl)*، 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 رخداده 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–دزبن در تونل شماره ۱ ازنظر 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 ازنظر مخاطره ریزش کلی تونل در رده بحرانی و ازنظر دو مخاطره شاخص آب ورودی و ناپایداری سینه‌کار تونل کمی مسئله‌دار پیش‌بینی شده است. درنتیجه، 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. باتوجه‌به قرارگیری پهنه‌های گسلی موردمطالعه در رده گسل‌های بحرانی و مسئله‌دار شناسایی دقیق این زون‌ها و در نظر گرفتن تمهیدات لازم در مواجهه با مناطق ضروری است.

نتیجه‌گیری

باتوجه‌به 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 موردمطالعه پرداخته شده است. به این منظور، پروژه‌های تونلی شماره ۱، ۶ و ۱۰ در مسیر پیشنهادی موردبررسی 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 موردمطالعه، نشان‌دهنده چالش‌های مختلف تونل‌سازی در طول عملیات حفاری این تونل‌ها هستند و در رده‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین چالش‌های زمین‌شناسی پیش‌بینی‌شده در زون‌های گسلی موردبررسی 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 موردبررسی 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., Khamehchiyan, 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., Khamehchiyan, 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.