

## بررسی تأثیر ویژگی های زمین شناسی مهندسی و ژئومکانیکی بر گام پیشروی مجاز تونل مهدی تلخابلو\*<sup>۱</sup>، سید محمود فاطمی عقدا<sup>۲</sup>، میلاد معتمدی<sup>۳</sup>

دریافت مقاله: ۹۳/۸/۱۷ پذیرش مقاله: ۹۵/۷/۷

### چکیده

نیروگاه های تلمبه ذخیره ای از جدیدترین سامانه هایی هستند که به طور غیرمستقیم به ذخیره انرژی برق می پردازند. با توجه به اهمیت تونل آب بر از جهت قرارگیری توربین ها و آگاهی از این موضوع که اکثر ناپایداری های شایع در فضا های زیرزمینی مدتی پس از اجرا و نپرداختن به بعضی مسائل مهندسی رخ می دهد اقدام به مطالعه ویژگی های زمین شناسی مهندسی مسیر تونل آب بر نیروگاه تلمبه ذخیره ای سد آزاد شده و تغییرات برخی از این پارامترها در نرم افزار Rockwork 2008 نشان داده شده است. همچنین در این تحقیق از طبقه بندی جدیدی موسوم به IRMR جهت مطالعه ویژگی های مهندسی توده سنگ های مسیر تونل بهره گرفته شده است. نتایج طبقه بندی IRMR با طبقه بندی های کلاسیک RMR و GSI نشانگر قرارگیری محدوده های ورودی و خروجی مسیر تونل در شرایط نامساعد بوده است. با مطالعه درزه های موجود در مسیر تونل و بهره گیری از نرم افزار المان محدود مناطقی که احتمال تشکیل گوه سنگی داشتند مشخص شده است. همچنین با بررسی های زمین شناسی مهندسی و به کمک معیارهای متداول موجود، احتمال مچاله شونده گی و انفجار سنگ مورد ارزیابی قرار گرفته و با لحاظ کردن آنها برای توده سنگ های مسیر تونل و استفاده از نرم افزار FLAC3D حداکثر گام مجاز پیش روی برای مناطق بحرانی پیشنهاد شده است.

**کلید واژه ها:** ویژگی های ژئومکانیکی، نیروگاه تلمبه ذخیره ای، *GSI, RMR, IRMR, FLAC 3D*

۱. استادیار گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران talkhablou@yahoo.com

۲. دانشیار گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشکده علوم زمین دانشگاه خوارزمی تهران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای اشاره به نوعی سیستم تولید برق از پمپاژ آب به مخزن بالادست در ساعات کم‌مصرف و رهاسازی آن در ساعات پیک مصرف دارد. بدیهی است که در ساعات پرمصرف پمپ نصب‌شده در تونل آبر به صورت برعکس گردش کرده و نقش توربین را ایفا خواهد کرد. انتقال آب بین مخازن تعبیه‌شده و دریاچه سد به کمک تونل آبر صورت می‌گیرد. لذا مطالعه این سازه از جهت پایداری، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و پیش‌بینی روند تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی جهت بررسی امکان خرابی از الزامات اجرای این‌گونه سازه‌های مهندسی است. اولین نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای جهان در سال ۱۸۹۰ در کشورهای ایتالیا و سوئیس مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. تاکنون بیش از ۱۹۰ نیروگاه آبی تلمبه ذخیره‌ای در جهان ساخته شده است که ایران تنها با داشتن یک نیروگاه آبی نیمه‌تمام در سیاه‌بیشه جزو کشورهایی است که به این فن‌آوری دست یافته است (وفاییان، ۱۳۸۴). این نیروگاه در استان مازندران قرار دارد که در زمان پمپاژ ۹۶۰ مگاوات انرژی مصرف خواهد کرد و در زمان تولید این مقدار به ۱۰۴۰ مگاوات تغییر می‌یابد. این طرح شامل دو سد در دو ارتفاع متفاوت است که اختلاف ارتفاع دو مخزن این نیروگاه به ۵۰۰ متر می‌رسد هر دو سد این نیروگاه از نوع سنگریزه‌ای با رویه بتنی هستند (سامانی و شهابی، ۱۳۸۸). از جدیدترین نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در حال ساخت در دنیا می‌توان نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای اینگولا در افریقای جنوبی را نام برد که پس از اتمام عملیات اجرایی در سال ۲۰۱۵ به تولید ۱۳۳۲ مگاوات خواهد رسید (Keyter Gerhard et al., 2008; and Varley, 2010). از جمله سایر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در حال ساخت جهان، می‌توان نیروگاه شیسان لینگ در کشور چین را نام برد که این نیروگاه نیز بعد از تجهیز کامل به تولید ۸۰۰ مگاوات برق خواهد رسید از مهم‌ترین مسائل پیش رو در ساخت این نیروگاه تکنیکی بودن و وجود گسل‌های فراوان بوده است که با روش‌های

مختلف عددی و تجربی به بررسی پایداری سازه‌ها، در مواجهه با این شرایط پرداخته‌اند (Li and Han, 2004). در طراحی تونل‌ها گام پیشروی مجاز یکی از مسائل مهمی است که تأثیر زیادی بر سرعت حفاری، با توجه به توان عملیاتی حفر تونل دارد. مباحث اقتصادی، زمان تحویل و مدیریت هرچه بهتر یک پروژه ارتباط مستقیم و تنگاتنگی با میزان حداکثر گام پیشروی مجاز دارد. از جمله مطالعات صورت گرفته در ایران، می‌توان به تعیین حداکثر گام مجاز پیشروی برای قطعه اول راه‌آهن قزوین- زنجان اشاره کرد (خانی و همکاران، ۱۳۹۰).

رودخانه کوماسی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه آزاد در شمال غرب شهرستان سنندج و از منابع اصلی تأمین‌کننده آب دریاچه سد آزاد است. با توجه به رشد روزافزون جمعیت و نیاز به منابع تأمین‌کننده برق جهت استفاده در اراضی کشاورزی، صنعتی و خانگی، طرح تونل آب بر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد جهت کنترل نوسانات برق در ساعات پیک مصرف از آب ذخیره‌شده در پشت دریاچه سد و منبع بالادست مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

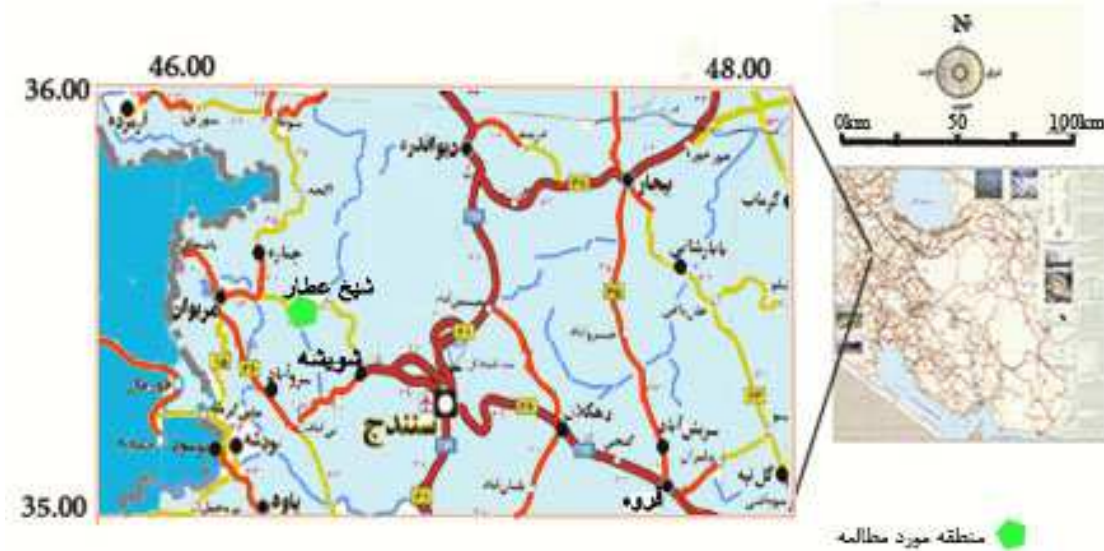
در این مقاله بعد از بیان ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل آب بر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد در نرم‌افزار Rockwork 14 به طبقه‌بندی توده‌سنگ‌ها بر اساس رده‌بندی‌های IRMR, RMR, GSI در ۳ قسمت ورودی، میانی و خروجی از مسیر تونل پرداخته شده است. سپس با مطالعه درزه‌های موجود در مسیر تونل مناطقی که مستعد تشکیل گوه بوده‌اند شناسایی شده است. در ادامه نیز ضمن لحاظ کردن احتمال مچاله شوندگی و ترکیدگی برای توده‌سنگ‌های مسیر تونل حداکثر گام مجاز پیش روی برای مناطق بحرانی پیشنهاد شده است.

## ۲. موقعیت جغرافیایی

تونل آبر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد با طول بیش از ۱۷۰۰ متر و قطر داخل ۷/۳ متر در تکیه‌گاه چپ سد آزاد در مختصات جغرافیایی ۶۶°۳۳' طول شمالی و ۳۵°۲۰' عرض شمالی و در ۷۵ کیلومتری غرب سنندج واقع شده است. رقوم

سنندج- مریوان و حدود ۱۷ کیلومتر پس از شهر کوچک شویشه امکان‌پذیر است. نقشه راه‌های دسترسی در شکل ۱ نشان داده شده است (شرکت توسعه منابع آب، ۱۳۸۶).

ارتفاعی تونل ۱۳۶۵/۹۷ متر در دهانه ورودی بوده که با شیب ۰/۶ درصد به سمت خروجی امتداد می‌یابد. رقوم خروجی تونل نیز ۱۳۶۳ است. دسترسی به این محل از طریق جاده



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد

ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ، به طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های مسیر تونل با استفاده از رده‌بندی IRMR, GSI, RMR پرداخته شده است. این طبقه‌بندی‌ها با توجه به اطلاعات گمانه‌های AB34 و AB33, AB32 در ورودی، قسمت میانی و خروجی تونل آب‌بر در سه زون مورد بررسی قرار گرفت.

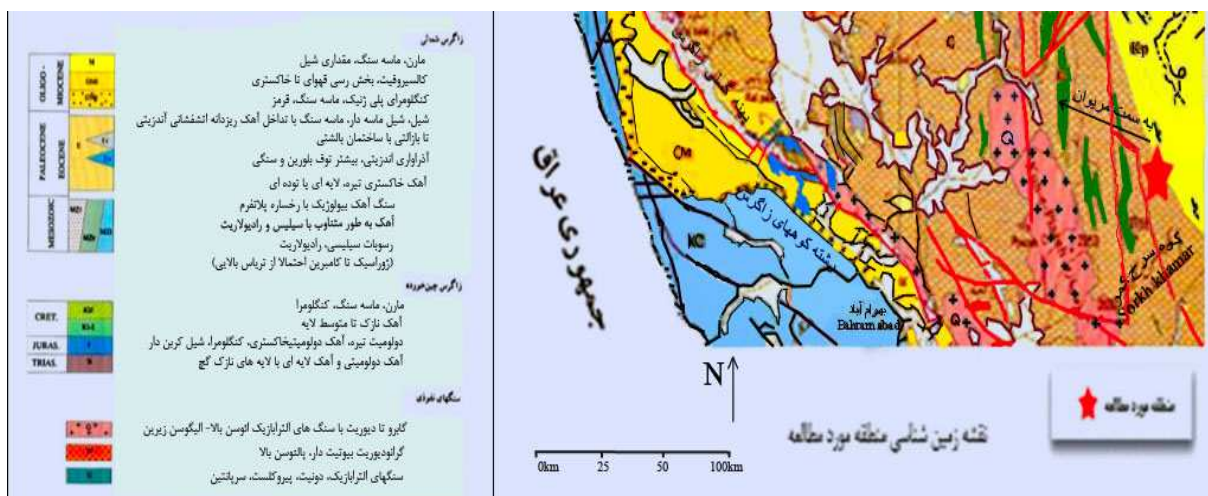
کاربرد روش‌های عددی علاوه بر توصیف شرایط بیان شده فوق ارائه دید سه بعدی از تغییرات پارامترهای مهندسی است که در طراحی و اجرای ایمن هر سازه‌ای الزامی است. (Evrin Sopaci and Akgun, 2008)

دست‌یابی به اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی به سه روش جمع‌آوری اطلاعات سطحی، زیرسطحی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. در طول مسیر تونل آب‌بر ۳ گمانه به طول مجموع ۱۹۰ متر حفاری شده است. برای دست‌یابی به اطلاعات آزمایشگاهی از مغزه‌های حاصل از گمانه‌ها استفاده شده است.

### ۳. ویژگی‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ تونل

موقعیت سد و سازه‌های وابسته به آن به لحاظ تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ایران در محدوده زون سنندج- سیرجان، (قسمت شمال غرب آن) قرار دارد. حداکثر ارتفاع روباره در مسیر تونل در ابتدای آن حدود ۵۰۰ متر می‌باشد. برش زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تونل آب‌بر نیروگاه بیانگر آن است که مسیر تونل از میان سنگ‌های فیلیتی و ماسه‌سنگی عبور می‌نماید که ممکن است در بخش‌های مختلف، میان لایه‌ها و عدسی‌هایی از آهک‌های شیستی و یا زبانه‌هایی از سنگ‌های شیست و شیل نیز ظهور یابد. نقشه زمین‌شناسی محدوده نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد در شکل ۲ آورده شده است.

تطابق و مقایسه اطلاعات گمانه‌ها و ثبت نمودار آن‌ها یک شمای کلی از وضعیت لایه‌ها و ضخامت آن‌ها را ارائه می‌دهد. از این طریق می‌توان به ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها در مسیر تونل مورد نظر پی برد. برای بررسی رفتاری و



شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد و سازه‌های وابسته. (شرکت توسعه منابع آب، ۱۳۸۶)

میلی متر تا حداکثر ۲ متر متغیر بوده است. بازشدگی درزه‌ها نیز در محدوده‌ای بین ۱ تا ۱۰ میلی متر قرار داشته که عموماً توسط کلسیت، لوم و اکسید آهن پر شده و در برخی مناطق نیز بدون پرشدگی بوده است.

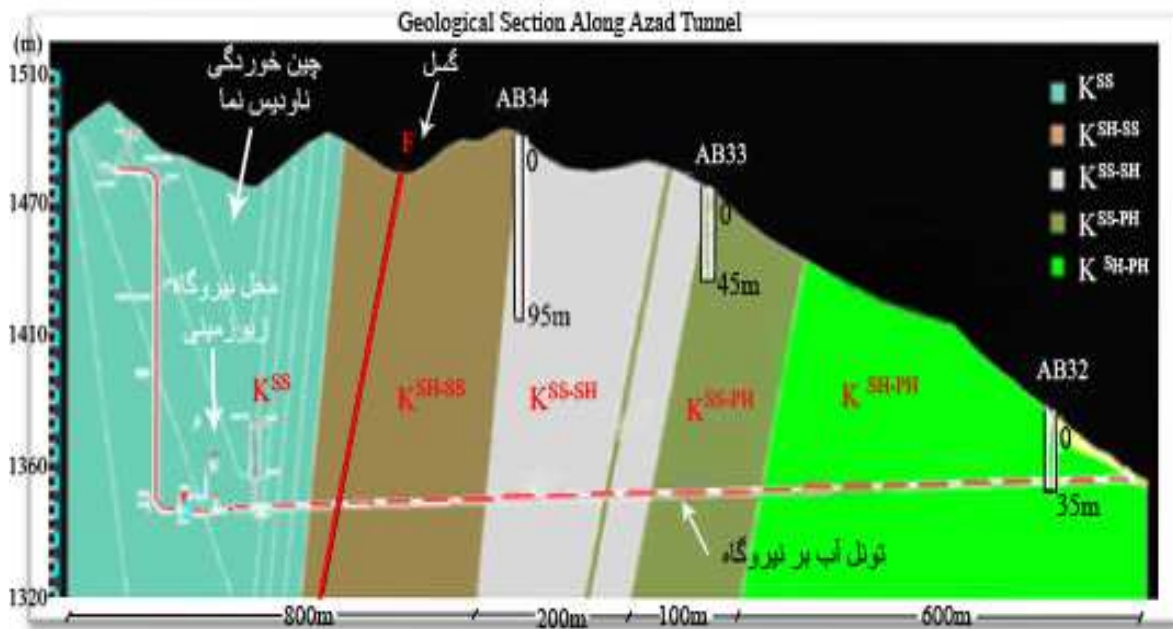
در مسیر تونل تنها یک گسل بزرگ با روند ۷۵/۰۵۵ مشاهده شده است. هرچند که به صورت موضعی در بعضی نقاط گسل‌های کوچک، مسیر تونل را قطع نموده‌اند اما این گسل که طول بیشتری داشته است مهم‌ترین آن‌ها بوده است. لازم به ذکر است که در طول مسیر تونل یک چین خوردگی ناودیس نما مشاهده شده است که با توجه به قرارگیری آن در انتهای مسیر تونل آبر و عدم وجود گمانه در این محدوده امکان اظهار نظر قطعی در مورد مکانیسم واقعی آن نبوده است.

توده سنگ‌های محل، مربوط به مزوزوئیک و در کرتاسه بالایی قرار دارند واحدهای مختلف مسیر تونل در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه ماسه سنگ، شیل و فیلیت در هر پنج زون به صورت مشترک وجود دارد و در هر قسمت یکی از آن‌ها مقدار غالب را داشته تصمیم گرفته شد که منطقه در ۳ زون بررسی شود (جدول ۱).

بر اساس بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که واحدهای مورد بررسی هوازگی کمی داشته و عموماً تازه بوده‌اند. همچنین مقاومت تراکمی تک‌محوره در محدوده‌ای بین ۲۵ تا ۳۰ مگاپاسگال قرار داشته است. شرایط ناپیوستگی زون‌های مورد نظر نیز به صورت نامنظم، موج‌داری اندک و در برخی نقاط مسطح بوده است. فاصله ناپیوستگی‌ها نیز حداقل ۵۰

جدول ۱. زمین شناسی مهندسی واحدهای مختلف

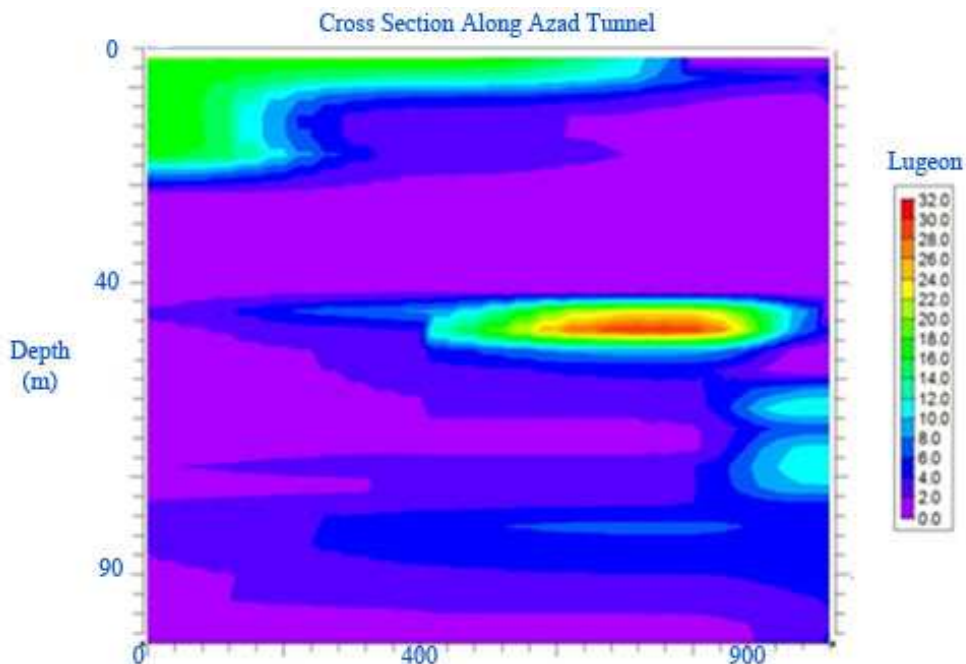
روند	توصیف	واحد سنگی	واحد	نوع سنگ
۸۰/۰۲۵	لایه‌های ماسه سنگ‌های خاکستری تا قهوه‌ای ضخیم لایه حاوی شیل	$K_{SS}$	A	۱
۸۰/۰۲۵	ماسه سنگ‌های دگرگون شده با فیلیت و شیست های کم دگرگون شده	$K_{SS.SH}$	B	۲
۷۸/۰۵۰	شیست و فیلیت و کلسیت دگرگون شده بامیان لایه‌های از شیل	$K_{SH.SS}$	C	۳
۷۰/۰۵۰	فیلیت حاوی فولیاسیون با میان لایه‌های از ماسه دگرگون شده	$K_{PH.SS}$		۴
۷۵/۰۲۰	فیلیت کلسیتی شده و شیست دگرگونی	$K_{SH.PH}$		۵



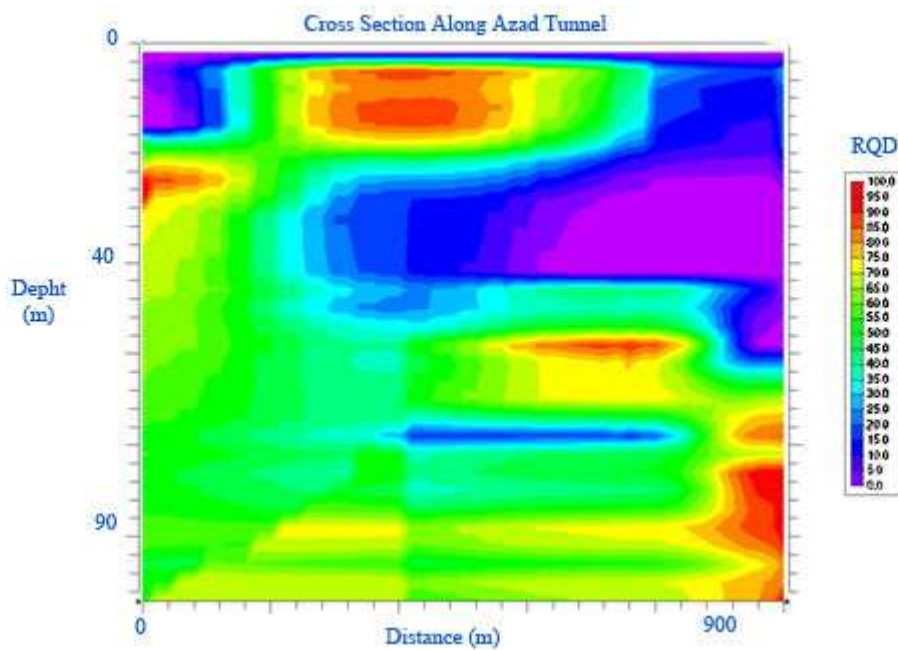
شکل ۳. واحدهای مختلف مسیر تونل

در این عمق نسبت داده می‌شود. در بررسی مقدار نفوذپذیری سنگ‌های منطقه نیز مشاهده شد که در اعماق سطحی لوژان سنگ زیاد بوده و با افزایش عمق، نفوذپذیری کاهش می‌یابد. در شکل ۴ و ۵ روند این تغییرات در امتداد مسیر تونل آب‌بر نشان داده شده است.

همبستگی بین اطلاعات گمانه‌ها نشان‌گر این موضوع بوده است که در اعماق سطحی به دلیل هوازدگی، شاخص کیفیت سنگ پایین و با افزایش عمق در محدوده مسیر تونل بر شاخص کیفیت سنگ افزوده شده است. در اعماق میانی (۴۵ متری) نوسانی در روند افزایش مقدار پارامتر کیفیت سنگ مشاهده می‌شود که این مورد به فراوانی بیش از حد درزه‌ها



شکل ۴. مقطع عرضی تغییرات لوژان در امتداد محور تونل



شکل ۵. مقطع عرضی تغییرات شاخص کیفیت سنگ در امتداد محور تونل

#### ۴. طبقه‌بندی توده سنگ مسیر تونل

۴-۱. طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ مسیر تونل آب‌بر به روش

GSI

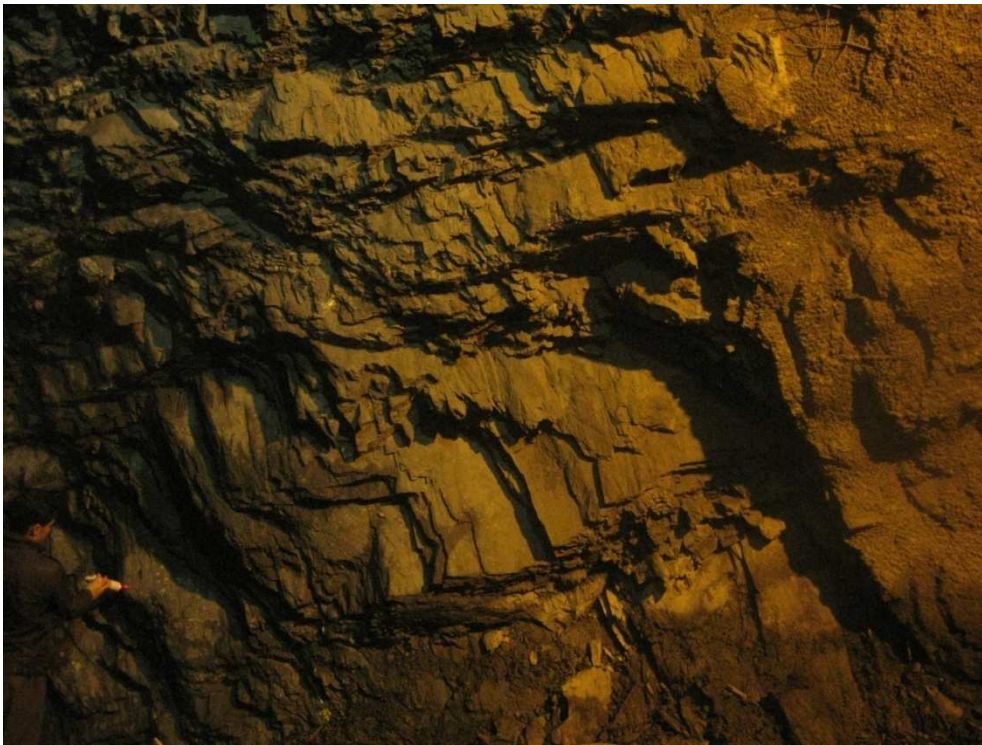
این طبقه‌بندی توسط (Hoek & Brown (1997) ابداع شده است. با توجه به شرایط توده سنگ‌های مسیر تونل، این توده سنگ‌ها از لحاظ ساختاری به صورت بلوکی تا خیلی بلوکی، قفل‌شدگی قطعات خوب، کمی دست‌خورده و سطوح درزه‌ها زبر با هوازگی خیلی کم تعریف شدند (شکل ۶). به این ترتیب دامنه مقادیر GSI در حدود ۶۰-۴۵ تعیین شد. نتایج این طبقه‌بندی در جدول ۲ نشان داده شده است

همان‌گونه که مشاهده می‌شود پارامتر شاخص کیفیت سنگ و نفوذپذیری تأیید کننده یکدیگرند، در اعماقی که شاخص کیفیت سنگ بالاست نفوذپذیری کم و در مناطقی که این شاخص کاهش می‌یابد سنگ نفوذپذیری بالایی نشان می‌دهد، اما در اعماق بیشتر (۸۰ متری) مشاهده می‌شود که سنگ، RQD پائینی داشته ولی نفوذپذیری افزایش نیافته است که با توجه به مطالعات زمین‌شناسی مهندسی دلیل این مورد پرشدگی درزه‌ها دانسته شده‌است. اکثر این پرشدگی‌ها را کلسیت، لوم و اکسید آهن تشکیل داده‌اند که باعث افزایش کاذب شاخص کیفیت سنگ و از سوی دیگر باعث کاهش نفوذپذیری سنگ شده‌اند.

جدول ۲. طبقه‌بندی GSI برای سه قطعه از مسیر تونل

GSI	منطقه
۴۵-۵۰	ورودی
۵۰-۶۰	میانه
۳۵-۴۵	خروجی





شکل ۶. نمونه دسته درزه‌های مسیر تونل

۲-۴. طبقه‌بندی مسیر تونل به روش RMR

یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین طبقه‌بندی‌های ارائه شده سیستم RMR است که توسط بنیاوسکی در سال ۱۹۷۴ ارائه

شده است. انجام این طبقه‌بندی برای سه بخش مورد نظر در جدول ۳ خلاصه شده است در مطالعه حاضر از تقسیم‌بندی سال ۱۹۸۹ استفاده شده است (Bieniawski, 2001).

جدول ۳. طبقه‌بندی RMR برای سه قطعه از مسیر تونل

پارامتر	ورودی	میانه	خروجی
مقاومت فشاری تک‌محوره	۵۰-۲۵ (MPa)	۵۰-۲۵ (MPa)	۵۰-۲۵ (MPa)
امتیاز	۲/۲	۳/۸	۴
شاخص کیفیت سنگ (درصد)	۷۰-۶۰	۷۵-۶۰	۶۵-۵۵
امتیاز	۱۱/۵	۹	۹
فاصله ناپیوستگی (میلی‌متر)	۶۰-۲۰۰	۵۵-۱۵۰	۶۰-۲۰۰
امتیاز	۷/۳	۷/۵	۸
وضعیت ناپیوستگی	سطوح نامنظم، نسبتاً زبر، جدایش کمتر از ۲.۵ و کمی	سطوح نسبتاً نامنظم، نسبتاً زبر، جدایش کمتر از ۱ و کمی	سطوح نسبتاً نامنظم، نسبتاً زبر، جدایش کمتر از ۲.۵ و کمی
امتیاز	هوازده ۲۲	هوازده ۲۶	هوازده ۲۱
وضعیت آب زیرزمینی	خشک	خشک	خشک
امتیاز	۱۴	۱۴/۵	۱۴
جهت یابی ناپیوستگی	نسبتاً خوب	نسبتاً خوب	نسبتاً خوب
امتیاز	-۵	-۵	-۵
درجه‌بندی توده سنگ	۵۲	۶۱	۵۱

مقاومت بلوک سنگی (RBS)، محتوی درزه‌ها، شرایط اصلاح شده درزه و اصلاح پارامتر شرایط آب زیرزمینی بوده است (Dyke, 2006, 2008).

Liu and Dang (2014) با انجام اصلاحات کلی بر روی دو سیستم گفته شده و ادغام آن‌ها روش M-IRMR را ارائه کرده‌اند که مجموعه‌ای از پارامترهای زمین‌شناسی و مهندسی عمران است. طبقه‌بندی اشاره شده علاوه بر اصلاح مقادیر امتیازی پارامترها، فاکتور تنش زمین را نیز تعریف می‌کند که امتیاز پارامتر جدید به کمک جدول مربوطه قابل تعیین است. با توجه به عدم دسترسی به پارامترهای عمرانی، در پژوهش حاضر تنها شرایط زمین‌شناسی بازبینی شده توسط این دو دانشمند مورد ملاحظه قرار گرفته‌اند. مقایسه نتایج حاصل از روش IRMR ابداعی توسط Liu and Dang (2014) با روش‌های کلاسیک RMR و GSI نشانگر قرارگیری زون‌های ورودی و خروجی در شرایط نامناسب بوده است. نتایج این طبقه‌بندی در جدول ۴ آورده شده است.

بر اساس طبقه‌بندی RMR، رده توده‌سنگ‌های موردبررسی نسبتاً خوب بوده است. زمان ایستایی ۱ هفته‌ای در زون خروجی نشان‌گر بحرانی بودن شرایط در این زون بوده است.

#### ۳-۴. طبقه‌بندی توده‌سنگ به روش IRMR

اغلب طبقه‌بندی‌های صورت گرفته در مهندسی عمران با در نظر گرفتن خواص مقاومتی سنگ‌ها صورت می‌گیرد اما در زمین‌شناسی و معدن، طبقه‌بندی‌ها با لحاظ کردن خواص محیطی و البته مکانیکی سنگ‌ها صورت می‌گیرد. Laubscher and Jakubec (2000) روشی را منتشر ساختند که با استفاده از مشاهدات صحرایی و انجام برخی اصلاحات، منجر به اصلاح روش قدیمی تر MRMR که توسط خودشان در سال ۱۹۹۰ ارائه شده بود گشت، روش اشاره شده اخیر ناقص و برای پارامترهای مقاومتی موجود در مهندسی عمران وزن بیشتری قائل بوده است. برخی از اصطلاحات جدیدتر روش (In-situ rock mass rating) نسبت به روش قدیمی تر آن شامل

جدول ۶. نتایج تحلیل آماری رگرسیون چند متغیره

متغیرها	ضرایب	خطای استاندارد ضرایب (SE)	T	P
ثابت	۰/۱۹۹	۰/۰۰۸۶	۲۳/۲۵	۰
(m/s) $V_p$	-۱۰*۱۰ <sup>(-۵)</sup>	۱/۱*۱۰ <sup>(-۶)</sup>	-۹/۵۴	۰
(g/cm <sup>3</sup> ) $\gamma_d$	-۰/۰۳۸	۰/۰۰۴۸	-۸/۰۲	۰
(Mpa)UCS	-۶/۱*۱۰ <sup>(-۵)</sup>	۳/۵۴*۱۰ <sup>(-۵)</sup>	-۱/۷۳	۰/۰۹۳
(Mpa) $\sigma_t$	-۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۱۸	-۲/۴۳	۰/۰۲

شوندگی را نام برد و ناپایداری مربوط به عملکرد فشار آب را نام برد. در مطالعه اخیر با توجه به عدم حضور آب و حفاری در شرایط مطلوب، احتمال رخداد ناپایداری سوم وجود ندارد. با این شرایط احتمال وقوع دو ناپایداری دیگر بررسی شده است.

#### ۱-۵. تحلیل ناپایداری ساختاری

تونل‌هایی که در مناطق با فراوانی زیاد درزه حفر می‌گردند با مخاطرات زیادی دست‌به‌گریبان هستند. سقوط و ریزش

#### ۵. تحلیل چالش‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیکی

##### پیش رو در مسیر تونل

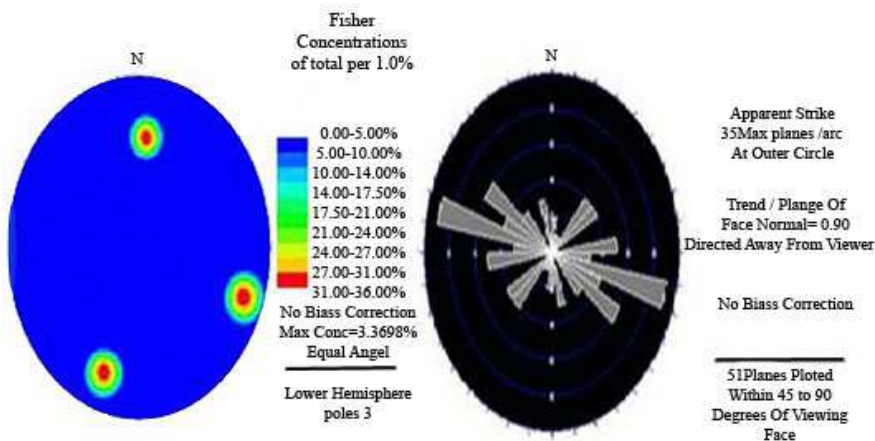
بر اساس نظر دانشمندان، ناپایداری‌های متفاوتی در حین یا پس از اجرای هر سازه‌ای با توجه به شرایط محل احتمال رخداد دارد (Hoek, 1997). بر اساس نظر (Hoek et al. 1997) و (Hoek, 2000) اکثر ناپایداری‌های شایع در فضا‌های زیرزمینی به ۳ صورت وجود دارند. ناپایداری ساختاری که تقریباً در تمام مطالعات وجود دارد، ناپایداری مربوط به جسم سنگ که از این دست می‌توان پدیده انفجار سنگ و یا مچاله



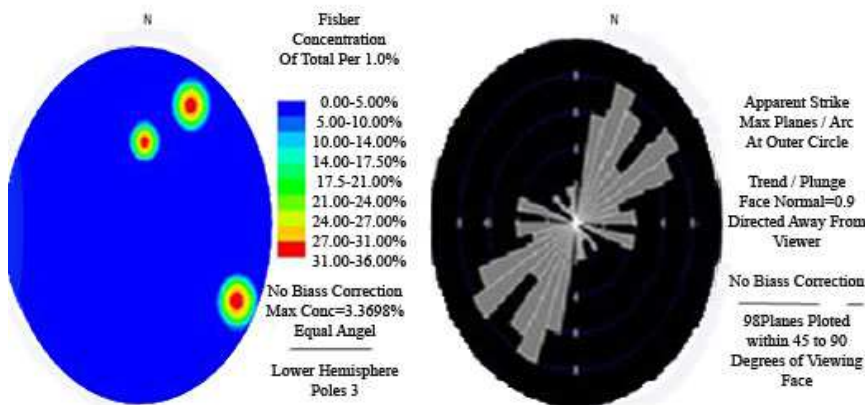
مشخص نمودن مناطق ناپایدار کمک می‌کنند می‌توان به روش اجزا محدود که نرم‌افزار UNWEDGE یکی از آنهاست اشاره کرد (اجل لوئیان و همکاران، ۱۳۸۷، Leil and Bruneau, 1995). در مجموع ۲۲۷ درزه در محدوده مورد مطالعه برداشت شده است. در ورودی ۵۱ درزه، در مسیر تونل ۹۸ درزه و در انتهای مسیر ۷۹ درزه مورد بررسی قرار گرفته است. تصاویر استریوگرافی مطالعه شده برای سه قسمت، در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به جهت‌یابی درزه‌ها این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که احتمال تشکیل گوه‌های سنگی و ریزش و ناپایداری محتمل بوده است.

گوه‌های سنگی یکی از معمول‌ترین این مخاطرات است (Khanlari et al., 2012).

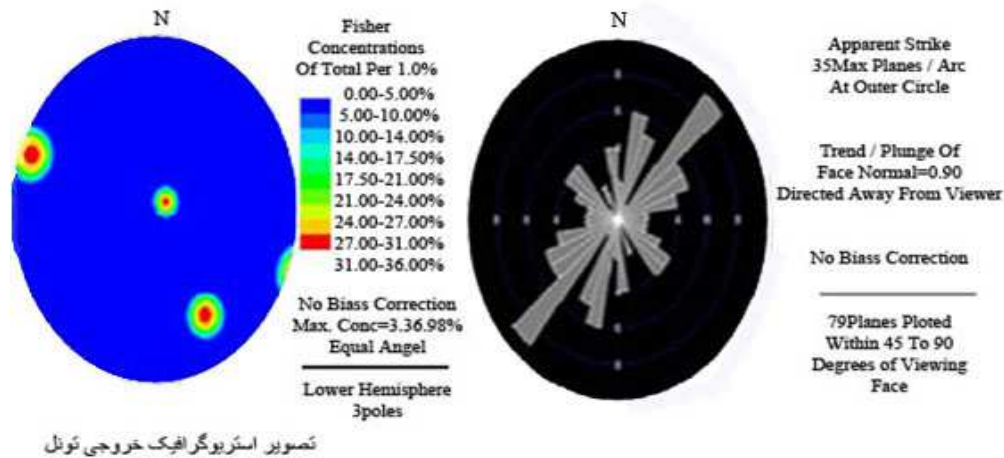
حضور همزمان ساختارهایی نظیر لایه‌بندی، درزه‌ها و همزمان حفر فضای زیرزمینی و از بین بردن تکیه‌گاه طبیعی سنگ، عوامل محرک این اتفاق به شمار می‌روند. با حفر فضای زیرزمینی و از بین بردن محدودیت و در هم قفل‌شدگی بین توده‌های سنگی، گوه‌های سنگی تشکیل شده اجازه حرکت می‌یابند که در صورت عدم کنترل باعث به بار آمدن هزینه‌های هنگفتی به روند اجرای پروژه می‌شوند. از مجموعه روش‌های شناسایی احتمال تشکیل گوه می‌توان مطالعات ژئومکانیکی و مطالعه در مورد شرایط درزه‌ها را نام برد. همچنین از روش‌های عددی راه‌گشا در این مورد که به



تصویر استریوگرافیک ورودی تونل



تصویر استریوگرافیک میانه تونل



شکل ۷. تصاویر استریو گرافی ورودی، میانه و خروجی تونل آب بر

گوه‌های تشکیل شده در سقف دچار واژگونی شده‌اند و همچنین گوه‌های تشکیل شده در دیواره‌ها بر روی نزدیک‌ترین درزه موجود می‌لغزند و همچنین گوه‌های تشکیل شده در کف تونل نیز حالت (Squeezing) و بالآمدگی نشان می‌داده‌اند.

همان‌گونه که از جدول ۵ پیداست اکثر گوه‌های تشکیل شده در ورودی و خروجی شرایط ناپایدار و نیمه پایدار دارند که خطر بالای حرکت آن‌ها و احتمال واژگونی این گوه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس تحلیل انجام شده توسط نرم‌افزار تمام

جدول ۵. نتایج تحلیل صورت گرفته و احتمال تشکیل گوه‌ها در طول مسیر

F.S	وضعیت پایداری	موقعیت	وزن گوه	شماره گوه	محل گوه	
۱/۵۶	لغزش روی درزه ۱	Upper right	۰/۳۸۵	۳	ورودی	
۴/۰۸	لغزش روی درزه ۳	left	۰/۰۰۲	۵		
۰/۰۰	سقوط	Upper left	۱/۸۸	۶		
۱/۱۶	لغزش روی درزه ۲	Near end	۳/۹۹۴	۷		
۱/۴۲	لغزش روی درزه ۱ و ۳	Far end	۳/۹۹۴	۸		
۲/۷	لغزش روی درزه ۱	Upper right	۰/۲۵۷	۳		مسیر
۴/۷	لغزش روی درزه ۲ و ۳	Lower left	۰/۲۵۷	۴		
۰/۰۰	سقوط	Upper left	۱۳/۴۸	۶		
۵/۷۴	لغزش روی درزه ۱ و ۳	Near end	۲/۳۷	۷		
۲/۰۵	لغزش روی درزه ۲	Far end	۲/۳۷	۸		
۰/۵۵	لغزش روی درزه ۲	Lower left	۰/۸۵۴	۴	خروجی	
۰/۴۷	لغزش روی درزه ۳	left	۱/۰۱	۵		
۰/۰۰	سقوط	Upper left	۰/۳۰۲	۶		
۱/۲۵	لغزش روی درزه ۲ و ۳	Near end	۱۲/۸۲	۷		
۲/۷۹	لغزش روی درزه ۱	Far end	۱۲/۸۲	۸		

## ۲-۵. تحلیل ناپایداری توده‌سنگ

در بسیاری از موارد توده‌سنگ در اثر عوامل مختلف به درون تونل حرکت می‌کند. از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین این حرکات می‌توان پدیده میچاله شونددگی و انفجار سنگ را نام برد که همواره از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی مهندسين بوده است.

پدیده میچاله شونددگی با تغییر شکل‌های بزرگ و همگرایی‌های وابسته به زمان در طی حفاری تونل همراه است. در اثر ایجاد و ترکیب تنش‌های القایی تنش موجود از حد مقاومت برشی گذشته و توده‌سنگ به داخل محدوده حفاری شده رانده می‌شود.

این تغییر شکل‌ها ممکن است در طی حفاری تونل یا در دوره‌های زمانی طولانی مدت ادامه داشته باشند. Gioda and Cividini (1996) در مقاله‌ای با عنوان تحلیل تأثیرات میچاله شونددگی غیرخطی در اطراف تونل‌های دایروی، میچاله شونددگی را تغییرات وابسته به زمان سنگ که در اثر تمرکز تنش روی می‌دهند تعریف کرده و آن را بیشتر ناشی از جذب آب می‌داند که ماهیتی بیشتر فیزیکی دارد، اما ایشان این مورد را از تورم که در خاک‌ها و سنگ‌های که شامل رس یا مونت موریلونیت روی می‌دهند جدا می‌داند و ماهیتی بیشتر شیمیایی را برای این پدیده متصور است همچنین Kovari (2005) با تأکید بر تفاوت فیزیکی و شیمیایی در این دو پدیده این‌گونه بیان می‌کند که هر تغییر شکل بزرگی ناشی از میچاله شونددگی نیست و هر جا که توده‌سنگ حاوی رس باشد با افزایش جذب آب متورم می‌شود.

تونل‌سازی در زمین‌های میچاله شونده باعث تأخیر طولانی در احداث یک پروژه تونل‌سازی و تحمیل هزینه‌های اقتصادی زیادی می‌شود. موارد موفقیت‌آمیز نیز با درک درست از مسائل

میچاله شونددگی و تشخیص مناسب رفتار توده‌سنگ در اروپا از قبیل تونل کریستینا در ایتالیا، گوتهارد در سوئیس و تونل سیمپلون که از مرز ایتالیا و سوئیس عبور می‌کند به عنوان نمونه‌هایی از تونل‌های حفر شده در حدفاصل سال‌های ۱۸۶۰ الی ۱۹۱۰ قابل ذکر می‌باشد (Barla, 2002).

اما پدیده انفجار سنگ از دیگر چالش‌های پیش رو در محیط‌های سنگی است که در حین استخراج مواد معدنی و حین حفر تونل در مناطق عمیق و عموماً در سنگ‌های مقاوم و در نقاط پرتنش رخ می‌دهد. حاصل این پدیده جدا شدن قطعات کوچکی از سنگ است حال آنکه در موارد دیگر ممکن است سبب جدا شدن قطعات بزرگ‌تری شود، تفاوت این دو پدیده در مقدار انرژی آزاد شده است و گرچه مکانیسم این دو پدیده یکسان دانسته شده است. از موارد مطالعه بر روی این پدیده می‌توان تونل‌های بزرگراهی کشور نروژ را نام برد که وجه اشتراک مطالعات صورت گرفته در آن‌ها، عامل این پدیده را تمرکز تنش‌های بزرگ دانسته است که تنش بزرگ‌تر حالتی تقریباً افقی داشته است. عامل دیگر روباره زیاد بیان شده است (مدنی، ۱۳۸۳).

## ۲-۵-۱. بررسی پتانسیل میچاله شونددگی

### ۲-۵-۱-۱. روش‌های تجربی

روش‌های تجربی بر پایه روش‌های طبقه‌بندی، ارائه شده‌اند. با وجود اینکه مسئله میچاله شونددگی در تونل‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است ولی عدم قطعیت‌های زیادی در آن مشاهده می‌شود (مهدوی و همکاران، ۱۳۸۸). دو روش مرسوم از روش‌های تجربی، در جدول ۶ خلاصه شده است که به کمک جدول ۷ نیز طبقه‌بندی نهایی در این دسته‌ها صورت می‌گیرد.

## جدول ۶. طبقه‌بندی رفتار توده‌سنگ طبق روش‌های تجربی

توضیحات	رابطه	روش‌های تجربی
سیستم طبقه‌بندی Q و سربار H	$H=350Q^{1/3}$	روش Singh et al. (2007)
عمق تونل برابر H، دهانه تونل B و عدد توده‌سنگ N	$H=275(N^{0.33}). B^{-1}$	روش Goel et al. (1997)

**جدول ۷. طبقه‌بندی رفتار توده‌سنگ طبق روش‌های تجربی**

شرایط مجاله شونذگی	همگرایی برحسب قطر تونل
مجاله شونذگی ملایم	۱٪-۳٪
مجاله شونذگی متوسط	۳٪-۵٪
مجاله شونذگی زیاد	۵٪ >

۲-۱-۲-۵. روش‌های نیمه تجربی

Hoek and Aydan et al. (1993) Jethwa et al. (1984)

Marinos (2000) را می‌توان نام برد. خلاصه موارد اشاره شده در جدول ۷ و ۸ بیان شده است.

این روش‌ها نیز شاخص‌هایی را جهت تعیین پتانسیل مجاله شونذگی تونل ارائه می‌دهند. از انواع دیگر این روش‌ها

**جدول ۷. طبقه‌بندی رفتار توده‌سنگ طبق روش‌های نیمه تجربی**

روش‌های نیمه تجربی	رابطه	توضیحات
Jethwa et al. (1984)		نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ یا توده‌سنگ به تنش برجا که ناشی از سربار است
Aydan et al. (1993)		مطابق رابطه قبل با این پیش‌فرض که مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر با توده‌سنگ برابر است. در این شرایط مجاله شونذگی زمانی رخ می‌دهد که نسبت $N_C$ کمتر از ۲ شود
Hoek and Marinos (2000)		نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ به تنش برجا و میزان کرنش شعاعی جداره تونل

**جدول ۸. طبقه‌بندی رفتار توده‌سنگ طبق روش‌های نیمه تجربی**

۱ >	۲/۵-۱	۵-۲/۵	۱۰-۵	۱۰ <
بدون مجاله شونذگی	مجاله شونذگی کم	مجاله شونذگی زیاد	مجاله شونذگی خیلی زیاد	مجاله شونذگی شدید
شدت مجاله شونذگی				
روش Jethwa et al. (1984)				
۰/۴ >	۰/۸-۰/۴	۲-۰/۸	۲ >	
مجاله شونذگی زیاد	مجاله شونذگی متوسط	مجاله شونذگی ملایم	بدون مجاله شونذگی	
شدت مجاله شونذگی				
روش Aydan et al. (1993)				

۳-۱-۲-۵. بررسی پتانسیل مجاله شونذگی تونل آب‌بر نیروگاه سد آزاد

مناطق پتانسیل مجاله شونذگی را از خود بروز داده است. این نتایج در جدول ۹ خلاصه شده است. خروجی حاصل از این روش‌ها محدوده ورودی و خروجی را در شرایط نامساعدی قرار داده است.

بر اساس نتایج تحلیل رفتار مجاله شونذگی با استفاده از روش‌های تجربی و نیمه تجربی که توسط دانشمندان مختلف صورت گرفته شده است، محدوده مسیر تونل آب‌بر در

جدول ۹. نتیجه روش‌های بررسی پتانسیل مچاله شوندگی مسیر تونل

Hoek and Marinos (2000)	Aydan et al. (1993)	Jethwa et al. (1984)	Singh et al. (2007)	Goel et al. (1997)	روپاره	پهنه
مچاله شوندگی کم	خفیف	غیر مچاله شونده	ملایم	متوسط	۵۰۰	۱۹۰-۱۸۰
مچاله شوندگی خیلی زیاد	متوسط	شدید	شدید	متوسط	۴۴۰	۶۰۰-۴۵۰
مچاله شوندگی زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	شدید	۴۳۰	۶۵۰-۶۳۰
مچاله شوندگی کم	غیر مچاله شونده	متوسط	متوسط	شدید	۳۸۰	۶۹۷-۶۹۰
مچاله شوندگی کم	خفیف	ملایم	ملایم	متوسط	۳۳۰	۱۰۰۰-۹۰۰
مچاله شوندگی زیاد	خفیف	متوسط	ملایم	ملایم	۳۲۰	۱۲۰۰-۱۱۵۰
مچاله شوندگی خیلی زیاد	متوسط	غیر مچاله شونده	شدید	ملایم	۳۰۰	۱۲۴۰-۱۲۰۰
مچاله شوندگی زیاد	خفیف	ملایم	متوسط	متوسط	۲۸۰	۱۲۶۰-۱۲۵۰
مچاله شوندگی کم	زیاد	متوسط	ملایم	متوسط	۲۷۰	۱۷۵۰-۱۶۰۰

۲-۲-۵. پدیده انفجار سنگ

پدیده انفجار سنگ در حین استخراج مواد معدنی در مناطق عمیق و عموماً در سنگ‌های مقاوم و در نقاط پرتنش رخ می‌دهد. این پدیده با آزاد شدن ناگهانی انرژی کرنشی ذخیره شده در سنگ در یک زمان کوتاه همراه است و علاوه بر آسیب‌رسانی به افراد و تجهیزات، باعث ریزش و ناپایداری فضای زیرزمینی می‌شود. (رحیم‌دل و باقرپور، ۱۳۹۱). این

پدیده پیش‌تر توسط کوازنیزوسکی و همکاران با عنوان معیار انرژی الاستیک خطی (kwasniewski et al., 1994) بررسی شده است. هرچند از روش‌های جدید دیگر می‌توان معیار تنش مماسی (Wang and park, 2001) معیار تردی Hsiung (2001) و معیار تنش‌ها (رحیم‌دل و باقر پور، ۱۳۹۱) را نام برد. روش‌های یادشده به‌اختصار در جدول ۱۰ و ۱۱ بیان گشته است.

جدول ۱۰. طبقه‌بندی پدیده انفجار سنگ

توضیحات	رابطه	روش
$\theta$ ، تنش و E کرنش	$PES = \frac{\theta^2}{2E}$	معیار انرژی الاستیک خطی (Kwasniewski, 1994)
نسبت تنش مماسی به مقاومت فشاری تک‌محوره		معیار تنش مماسی (Wang and Park, 2001)
نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره به مقاومت کششی	$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	معیار تردی (Hsiung, 2001)
نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره به تنش اصلی حداکثر	$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_1}$	معیار تنش‌ها (رحیم‌دل و باقر پور، ۱۳۹۱)

جدول ۱۱. طبقه‌بندی پدیده انفجار سنگ

PES	۵۰ <	۱۰۰-۵۰	۱۵۰-۱۰۰	۲۰۰-۱۵۰	۲۰۰ >
شدت انفجار	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
شدت انفجار	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید
B	۴۰ <	۲۶/۷-۴۰	۱۴/۵-۲۶/۷	۱۴/۵ >	
شدت انفجار	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید	



## ۵-۲-۱. بررسی پتانسیل انفجار سنگ مسیر تونل آب بر نیروگاه سد آزاد

نتایج حاصل از بررسی پتانسیل انفجار سنگ بر اساس معیارهای مختلف، در جدول ۱۲ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود معیار انرژی الاستیک در طول مسیر را با توجه به تغییر روباره می‌توان توجیه نمود. بر اساس معیار تنش مماسی نیز اکثر مناطق بررسی در رده متوسط قرار گرفته‌اند. بر اساس معیار تردی اکثر محدوده‌های بررسی بدون انفجار معرفی شده‌اند که ناشی از مقاومت کششی پائین توده‌های سنگی دانسته شده است، اما معیار تنش، اکثر مناطق را با پتانسیل انفجار متوسط تا شدید معرفی می‌کند که این مورد نیز با تنش بالا در محدوده بررسی توجیه می‌شود. به‌طور کلی و با در نظر گرفتن کلیه روش‌های به کار گرفته شده می‌توان این‌گونه بیان کرد که محدوده ابتدایی از مسیر شرایط انفجار بالایی داشته است که با رسیدن به انتهای مسیر از مقدار آن کاسته شده است.

جدول ۱۲. پتانسیل انفجار سنگ‌های مسیر تونل

پهنه	معیار تنش	معیار تردی	تنش مماسی	انرژی الاستیک
۱۸۰-۱۹۰	متوسط	بدون انفجار	ضعیف	متوسط
۴۵۰-۶۰۰	متوسط	شدید	متوسط	متوسط
۶۳۰-۶۵۰	شدید	بدون انفجار	متوسط	زیاد
۶۹۰-۶۹۷	شدید	متوسط	شدید	زیاد
۹۰۰-۱۰۰۰	متوسط	بدون انفجار	متوسط	متوسط
۱۱۵۰-۱۲۰۰	شدید	بدون انفجار	شدید	زیاد
۱۲۰۰-۱۲۴۰	متوسط	بدون انفجار	ضعیف	خیلی کم
۱۲۵۰-۱۲۶۰	ضعیف	متوسط	متوسط	کم
۱۶۰۰-۱۷۵۰	متوسط	بدون انفجار	ضعیف	خیلی کم

## ۶. تعیین حداکثر گام مجاز پیشروی

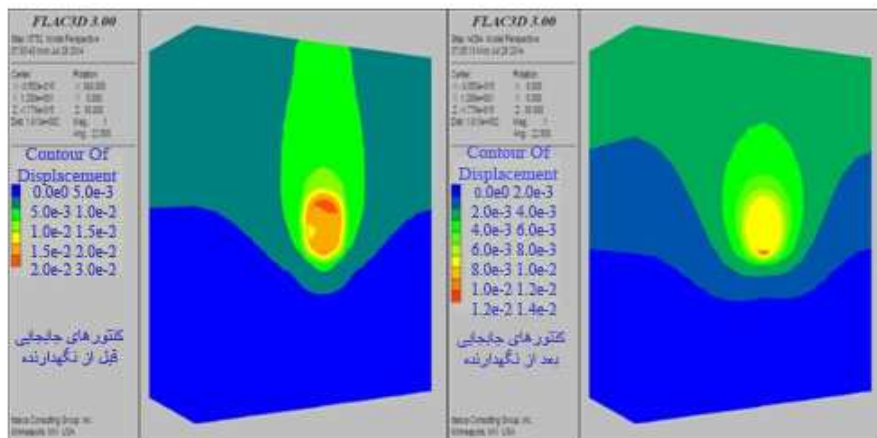
با در نظرگیری مسائل بیان شده و با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی شرایط زمین‌شناسی مهندسی، ژئومکانیکی، مطالعه درزه‌ها بر روی سه قسمت ورودی، میانه و خروجی

تونل، مطالعه پتانسیل مچاله شوندگی و انفجار سنگ، محدوده ورودی و همچنین خروجی تونل آب‌بر در شرایط نامساعدی قرار گرفته است. با در نظرگیری مسائل فوق، شرایط اقتصادی، مدت زمان اجرا و در نهایت بالا بردن سرعت پیشروی اقدام به تعیین گام پیشروی مجاز برای این دو محدوده به کمک نرم‌افزار FLAC 3D شده است. جهت حصول به این نتیجه از کرنش برشی بحرانی ساکورائی استفاده شده است (Sakurai et al., 1994). بر این اساس جابجایی مجاز (Ur) ۱/۴۲ سانتی‌متر و کرنش برشی مجاز (γc) میانگین ۰/۴۷ برای این دو زون محاسبه گردیده است.

با توجه به زون‌بندی صورت گرفته در نرم‌افزار و اعمال پارامترهای ورودی (جدول ۱۳) و شرایط مرزی، به مدل‌سازی تونل آب‌بر اقدام شده است، با این شرایط تعادل اولیه مدل بررسی شده است که به شرایط اولیه زمین نزدیک باشد. در مراحل بعد اقدام به حفر مرحله به مرحله تونل شده است و سیستم نگهدارنده نیز اعمال شده است تا میزان پایداری و در ضمن گام‌های پیشروی مجاز معین شود. در شکل ۸ جابجایی قبل و بعد از نصب سیستم نگهدارنده در حالت گام ۳ متری برای ورودی تونل نشان داده شده است. این گام حداکثر گام مجاز پیشروی برای محدوده اول با توجه به پتانسیل بالای مچاله شوندگی و انفجار سنگ و احتمال تشکیل گوه‌های مختلف در آن می‌باشد. بدیهی است در مقادیر بیشتر همان‌گونه که در جدول ۱۴ نشان داده شده است جابجایی افزایش می‌یابد طوری که اعمال سیستم نگهدارنده نیز نمی‌تواند مانع بروز بیش از حد جابجایی باشد؛ بنابراین با توجه به شرایط پیش رو در تونل آب‌بر این‌گونه پیشنهاد می‌گردد که گام پیشروی مجاز حداکثر ۳ متری را برای افزایش سرعت حفاری و همچنین ایمنی بیشتر تجهیزات و کارکنان در ورودی تونل مدنظر قرارداد. در شکل ۹ نیز عدم تغییر در زون پلاستیک در گام چهار متری نشان داده شده است که نشان‌گر شرایط بحرانی برای این گام پیش روی در ورودی تونل است.

جدول ۱۳. پارامترهای ورودی نرم‌افزار برای دو زون مورد بررسی

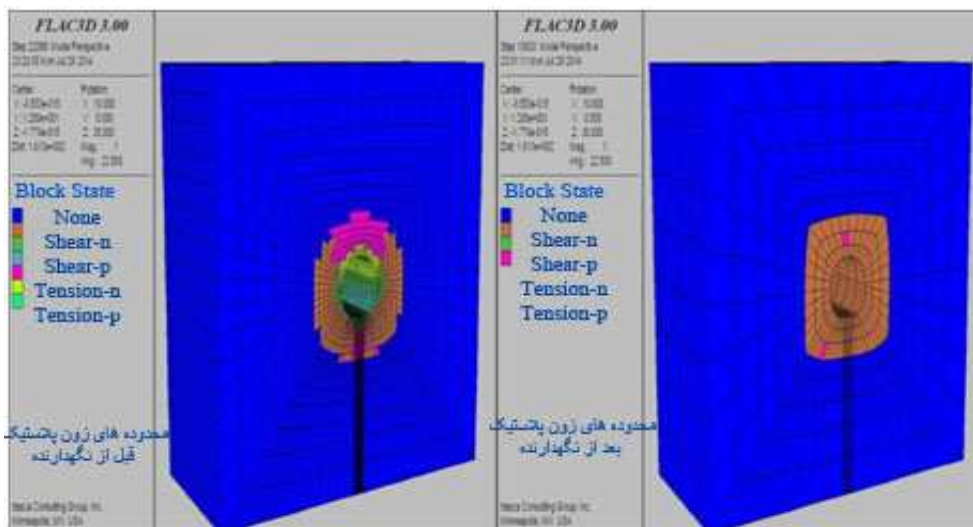
نام واحد	مدول حجمی (GPa)	مدول برشی (GPa)	مقاومت کششی (KPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	جرم حجمی (MN/m <sup>3</sup> )	زاویه اتساع (درجه)
ماسه سنگ	۳/۳۳	۲/۳۹	۳۰۰	۳۳	۰/۰۲۶	۵/۷
فیلیت	۱/۹۶	۰/۹۵۹	۲۵۰	۲۸	۰/۰۲۷	۲/۸



شکل ۸. میزان جابجایی ۳ متری قبل و بعد از اعمال نگهدارنده زون مایه سنگی در FLAC 3D

جدول ۱۴. نتایج حاصل از گام‌های پیش روی مختلف در ورودی تونل

گام (متر)	جابجایی (سانتی‌متر)	کرنش برشی (درصد)
۱	۰/۷۵	۰/۳
۲	۱	۰/۴
۳	۱/۳	۰/۴
۴	۳/۵	۰/۶



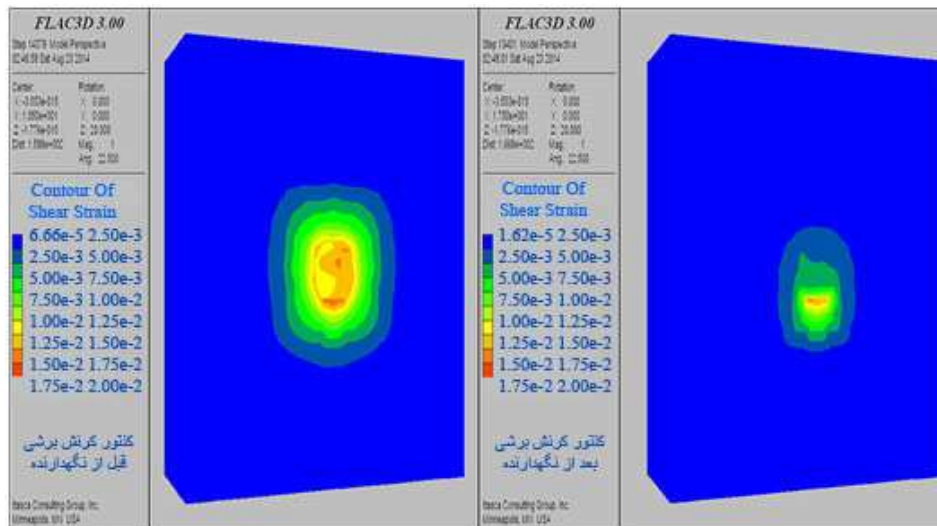
شکل ۹. عدم تغییر در زون پلاستیک قبل و بعد از اعمال نگهدارنده در گام ۴ متری در ورودی تونل

فیلیتی، حداکثر گام مجاز پیش روی ۲ متر تعیین شده است تغییر در زون پلاستیک در این گام در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بدیهی است که این مقدار، حد بالای گام پیش روی مجاز بوده که برای افزایش ایمنی باید مقداری کمتر از این حد را در ضمن حفاری منظور کرد.

و اما با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیکی محدوده خروجی تونل نیز در شرایط بحرانی قرار می‌گرفت، با اقدامی مشابه به مدل‌سازی مسیر و تعیین گام پیشروی مجاز مبادرت شده است این نتایج در جدول ۱۵ مشاهده می‌گردد. با توجه به نتایج نرم‌افزار برای محدوده

جدول ۱۵. نتایج حاصل از گام‌های پیش روی مختلف در خروجی تونل

گام (متر)	جابجایی (سانتی‌متر)	کرنش برشی (درصد)
۱	۱	۰/۳۸
۲	۱/۴	۰/۴۵
۳	۲	۰/۷۵



شکل ۱۰. تغییر در زون پلاستیک قبل و بعد از نگه‌دارنده در گام ۲ متری خروجی تونل

کیفیت سنگ و از سمتی دیگر سبب کاهش میزان نفوذپذیری شده است.

همچنین بر اساس طبقه‌بندی صورت گرفته به سه روش RMR، GSI و IRMR نتیجه گرفته شد که سنگ‌های مسیر

تونل در ورودی و خروجی در شرایط نامناسبی قرار دارند.

انجام مطالعات بر روی بیش از ۲۲۰ درزه با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود بر روی سه زون مورد نظر مشخص نمود که زون‌های ورودی و خروجی فاکتور اطمینان کمتری از لحاظ احتمال حرکت گوه‌های سنگی ایجاد می‌کنند.

با لحاظ کردن مطالعات زمین‌شناسی مهندسی احتمال دو پدیده ترکیدگی سنگ و مچاله شوندگی برای این سه زون

## ۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر ابتدا به بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی در طول مسیر تونل در نرم‌افزار Rockwork 14 پرداخته شده است و این ویژگی‌ها برای توده‌سنگ‌های مسیر بیان شده است. این بررسی بیان‌گر این موضوع بوده است که با افزایش عمق شاخص کیفیت سنگ افزایش و نفوذپذیری سنگ کاهش می‌یابد و نوسانات مشاهده شده شاخص کیفیت سنگ در اعماق ۴۵ متری را می‌توان به فراوانی درزه‌ها نسبت داد. عدم تبعیت این دو پارامتر از یکدیگر در اعماق ۸۰ متری ناشی از پرتشدگی درزه‌ها و عدم ارتباط هیدرولیکی بین دستگاه‌های ناپیوستگی است که سبب افزایش کاذب شاخص

بیان شده تنها گزینه پیش رو تقویت سیستم نگه‌دارنده خواهد بود که این امر خود باعث سنگین‌تر شدن نگه‌دارنده و ایجاد مشکلات پایداری بعدی خواهد شد.

انجام مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیکی با تأکید بر چالش‌های پیش‌رو در مسیر تونل و در ادامه انجام تحلیل عددی با نرم‌افزارهای سه بعدی به عنوان مسیری قابل اطمینان جهت ارائه بهینه گام پیش‌روی مجاز پیشنهاد می‌شود. با توجه به حضور توده‌سنگ‌های معرفی شده در سایر نقاط، مطالعه حاصل می‌تواند برای سایر نقاط نیز مورداستفاده قرار گیرد. به‌کارگیری مجموعه روش‌های فوق، باعث افزایش ایمنی و کوتاه کردن زمان اجرا با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی خواهد شد.

حاصل شد که پدیده انفجار سنگ در ورودی تونل محتمل‌تر از سایر نقاط بوده است و احتمال پدیده مچاله شونده نیز در ورودی و خروجی تونل بیشتر از قسمت میانه به‌دست‌آمده است.

با انجام مطالعات فوق زون‌های ورودی و خروجی نامساعد تشخیص داده شدند. بر این اساس و به کمک نرم‌افزار FLAC 3D اقدام به تعیین حداکثر گام مجاز پیشروی برای این دو زون شده است که نتایج این مرحله نیز در جداول ۱۴ و ۱۵ بیان شده است.

نهایتاً اینکه با توجه به شرایط بیان‌شده حداکثر گام مجاز پیشروی برای ورودی ۳ متر و برای خروجی تونل آب‌بر حداکثر ۲ متر محاسبه شده است. در گام‌های بیشتر از مقادیر

## منابع

- اجل لوثیان، ر.، دادخواه، ر.، هاشمی، م.، ۱۳۸۷. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگه‌دارنده تونل انحراف سد خرسان ۳. مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۱، ۳۷-۴۵.
- خانی، ع.، رسولی، م.، باغبانان، ع.، ۱۳۹۰. بررسی سه‌بعدی تأثیر هندسه تونل در محاسبه گام پیشروی مجاز در تونل‌های نعل اسبی. نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل فضاها و زیرزمینی برای توسعه پایدار، تهران، ایران.
- رحیم‌دل، م.، باقرپور، ر.، ۱۳۹۱. طراحی نگه‌دارنده اولیه تونل انتقال آب گلاب با تأکید بر خطرات زمین‌شناسی. فصل‌نامه زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۴، ۳۲۳-۳۳۴.
- سامانی، ر.، و شهابی، م.، ۱۳۸۸. آنالیز پایداری و تخمین نگهداری تونل‌های آب‌رسان سد و نیروگاه سیاه‌بیشه با روش VNIIMI. فصل‌نامه کیسون، شماره ۴۰.
- شرکت توسعه آب و نیروی ایران، ۱۳۸۶. گزارش زمین‌شناسی مهندسی طرح سد مخزنی آزاد.
- مدنی، ح.، ۱۳۸۳. تونل سازی تحلیل پایداری، جلد سوم انتشارات دانشگاه امیرکبیر.
- مهدوی، س.، هاشمی، م.، آیتی، ف.، ۱۳۸۸. بررسی پتانسیل مچاله شونده در تونل انتقال آب بهشت‌آباد، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه یزد.
- وفائیان، م.، ۱۳۸۴. اطلاعات اجرایی در مورد سدهای خاکی، انتشارات ارکان، اصفهان.
- Aydan, O., Akagi, T., Kawamoto, T., , 1993. The squeezing potential of rock around tunnels: theory and prediction. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26 (4): 137-163.
- Barla, G., 2002. Tunnelling under squeezing rock Conditions. In: Kolymbas, D. (ed.), *Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling*, pp. 169-268.
- Bieniawski, Z.T., 2001. *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley-Interscience publication, hopra AK. *Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (2nd ed.), Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Dyke, G.P., 2006. *A Quantitative Correlation Between the Mining Rock Mass Rating and In-Situ Rock Mass Rating Classification*. A research report submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand, Johannesburg, in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering.

- Dyke, G.P., 2008. Rock mass characterization: A comparison of the MRMR and IRMR classification systems, surface mining. *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Surface Mining*, pp. 217-223.
- Evrin Sopaci, A., Akgün, H., 2008. Engineering geological investigations and the preliminary support design for the proposed Ordu Peripheral Highway Tunnel, Ordu, Turkey. *Engineering Geology*, 96: 43–61.
- Gerhard, M.R., Keyter, J., Monique Ridgway, M.S., Paul, V., Varley, M., 2008. Rock Engineering Aspects of the INGULA Powerhouse Caverns. *The 6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction*.
- Gioda, G., Cividini, A., 1996. Numerical methods for the analysis of tunnel performance in squeezing rocks. *Rock mechanics and Rock Engineering*, 29(4): 171-193.
- Goel, R.K., Jetwa, J.L., Dube, A.K., 1997. Support Pressure Assessment in Arched Underground Opening through Poor Rock Masses. *Engineering Geology*, 48: 59-81.
- Hoek, E., Kaiser, P., Bawden, W.F., 1997. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A.A.Balkema Publishers,.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8): 1165-1186.
- Hoek, E., 1997. *Support of Underground Excavations in Hard Rock* (www.rocsience.com).
- Hoek, E., 2000. *Rock Engineering, Course Notes* (www.rocsience.com).
- Hsiung, S.M., 2001. *Predicting Rock Burst*. Institute of Technology Today, SWRI Publication.
- Hoek, E., Marinos, P., 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak Heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunneling International*, 45 -51(part one), 33-36 (part two).
- Jethwa, J.L., Singh, B., Singh M., 1984. Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions – a new approach. In: Brown, E.T. & Hudson, J. A. (eds.), *Design and Performance of Underground Excavations*, ISRM Symposium, Cambridge, pp. 231-238.
- Khanlari, G., Ghaderi meybodi, R., Mokhtari E., 2012. Engineering geological study of the second part of water supply Karaj to Tehran tunnel with emphasis on squeezing problems. *Engineering Geology*, 145: 146, 9–17.
- Keyter, G.J., Varley, P.M., 2010. Ingula pumped storage scheme: Excavation and support of the main powerhouse caverns. Braamhoek Consultants Joint Venture, Construction design brief - Main Underground Works.
- Kovari, K., 2005. Method and device for stabilizing a cavity excavated in underground construction. US Patent Appl. 20050191138.
- Kwasniewski, M., Szutkowski, I., Wang, J.A., 1994. Study of ability of coal from seam 510 for storing elastic energy in the aspect of assessment of hazard in Porabka- Klimontow Colliery. Science Report. Silesian Technical University.
- Li, G., Han, Z., 2004. Principal engineering geological problems in the Shisanling Pumped Storage Power Station, China. *Engineering Geology*, 76: 165-176.
- Liu, Z.X., Dang, W.G., 2014. Rock quality classification and stability evaluation of undersea deposit based on M-IRMR, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40: 95–101.
- Laubscher, D.H., Jakubec, J., 2000. The IRMR/MRMR rock mass classification system for jointed rock masses. In: *SME Annual Meeting*, February 28–March 1, Salt Lake City, Utahpp. pp. 475–481.
- Leli, M., Bruneau, M., 1995. Seismic performance of single-span simply supported and continuous slab-on-girder steel highway bridges. *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 121(10): 1497-1506,.
- Singh, M., Singh, B., Choudhari, J., 2007. Critical strain and squeezing of rock mass in tunnels. *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 22: 343-350.
- Sakurai, S., Kawashima, I., Otani, T., Matsumura, S., 1994. Critical shear strain for assessing the stability of tunnels . In *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 493, pt 3-2, pp. 185-188.
- Wang, J.A., Park, H.D., 2001. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks", *Tunneling and Underground Space Technology*, 16: 49-57.