مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز و زمستان ۱۳۹۴، جلد هشتم، شماره ۳ و ٤، صفحه ٤٧ تا٦٤

بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی‌مهندسی و ژئومکانیکی بر گام پیشروی مجاز تونل

مهدی تلخابلو[*1]، سید محمود فاطمی عقدا[2]، میلاد معتمدی[3]

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

چکیده

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای از جدیدترین سامانه‌هایی هستند که به‌طور غیرمستقیم به ذخیره انرژی برق می‌پردازند. با توجه به اهمیت تونل آب بر از جهت قرارگیری توربین‌ها و آگاهی از این موضوع که اکثر ناپایداری‌های شایع در فضاهای زیرزمینی مدتی پس از اجرا و نپرداختن به بعضی مسائل مهندسی رخ می‌دهد اقدام به مطالعه ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل آب بر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد شده و تغییرات برخی از این پارامترها در نرم‌افزار Rockwork 2008 نشان داده شده است. همچنین در این تحقیق از طبقه‌بندی جدیدی موسوم به IRMR جهت مطالعه ویژگی‌های مهندسی توده‌سنگ‌های مسیر تونل بهره گرفته شده است. نتایج طبقه‌بندی IRMR با طبقه‌بندی‌های کلاسیک RMR و GSI نشانگر قرارگیری محدوده‌های ورودی و خروجی مسیر تونل در شرایط نامساعد بوده است. بامطالعه درزه‌های موجود در مسیر تونل و بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود مناطقی که احتمال تشکیل گوه سنگی داشتند مشخص‌شده است. همچنین با بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی و به کمک معیارهای متداول موجود، احتمال مچاله شوندگی و انفجار سنگ مورد ارزیابی قرار گرفته و با لحاظ کردن آنها برای توده‌سنگ‌های مسیر تونل و استفاده از نرم‌افزار FLAC3D حداکثر گام مجاز پیش روی برای مناطق بحرانی پیشنهاد شده است.

کلید واژه‌ها: *ویژگی‌های ژئومکانیکی، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، FLAC 3D، IRMR، RMR، GSI.*

---

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

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

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

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای اشاره به‌نوعی 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 آب‌بر به‌صورت برعکس گردش کرده و نقش توربین را ایفا خواهد کرد. انتقال آب بین مخازن تعبیه‌شده و دریاچه سد به کمک تونل آب‌بر 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 قرارگرفته‌اند. 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، ۱۳۸٤). این نیروگاه در استان مازندران قرار دارد که در زمان پمپاژ ۹٦۰ مگاوات انرژی مصرف خواهد کرد و در زمان تولید این مقدار به ۱۰٤۰ 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). ازجمله 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 تکتونیکی بودن و وجود گسل‌های فراوان بوده است که با روش‌های مختلف عددی و تجربی به بررسی پایداری سازه‌ها، در مواجه 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).

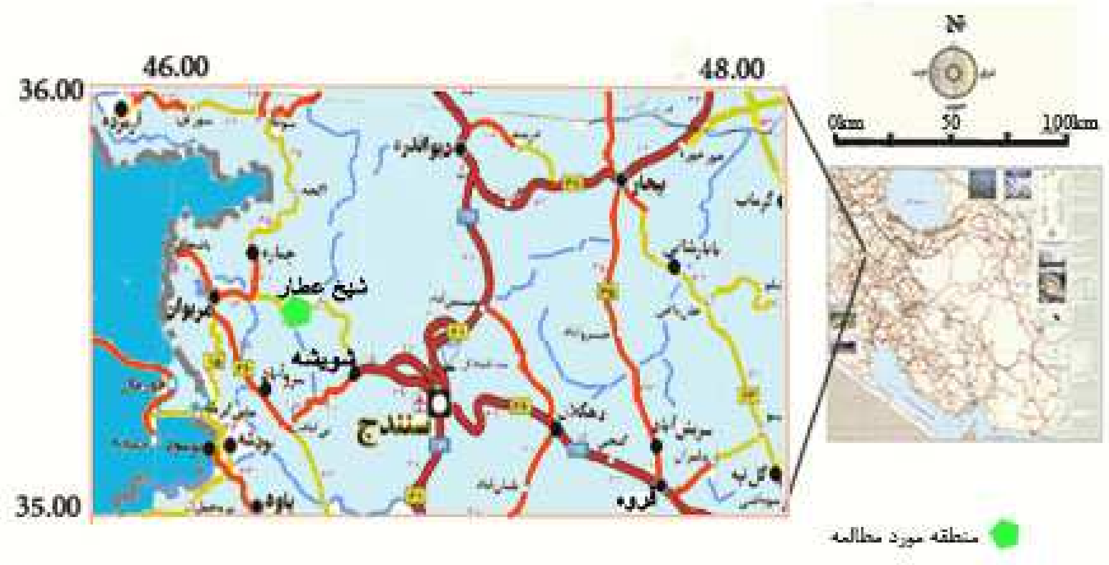
رودخانه کوماسی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه آزاد در شمال غرب شهرستان سنندج و از منابع اصلی تأمین‌کننده آب دریاچه سد آزاد است. با توجه به رشد روزافزون جمعیت و نیاز به منابع تأمین‌کننده برق جهت استفاده در اراضی کشاورزی، صنعتی و خانگی، طرح تونل آب بر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد جهت کنترل نوسانات برق در ساعات پیک مصرف از آب ذخیره‌شده در پشت دریاچه سد و منبع بالادست مورد بهره‌برداری قرارگرفته 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 آب‌بر نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد با طول بیش از ۱۷۰۰ متر و قطر داخل۷/۳ متر در تکیه‌گاه چپ سد آزاد در مختصات جغرافیایی'٤٦°۳۳ طول شمالی و '۳۵°۲۰ عرض شمالی و در ۷۵ کیلومتری غرب سنندج واقع شده است. رقوم

ارتفاعی تونل ۱۳٦۵/۹۷ متر در دهانه ورودی بوده که با شیب ۰/٦ درصد به سمت خروجی امتداد می‌یابد. رقوم خروجی تونل نیز ۱۳٦۳ است. دسترسی به این محل از طریق جاده 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، ۱۳۸٦).



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

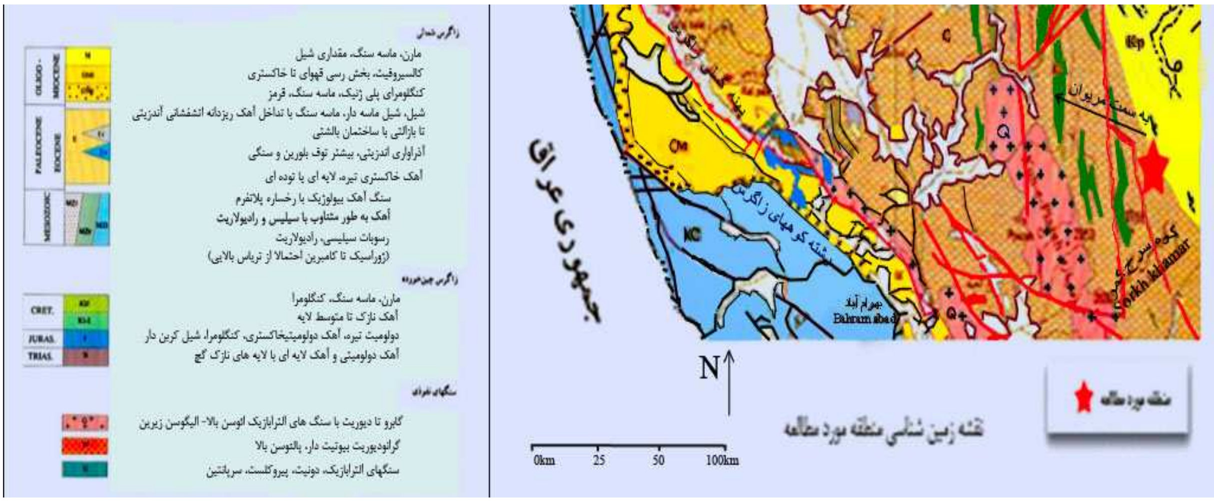
۳. ویژگی‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی توده‌سنگ تونل

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 ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی توده‌سنگ، به طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های مسیر تونل با استفاده از رده‌بندی IRMR,GSI,RMR پرداخته شده است. این طبقه‌بندی‌ها با توجه به اطلاعات گمانه‌های AB32، AB33 و AB34 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).

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


جمهوری عراق
رشته کوه‌های زاگرس
بهرام آباد
Bahram abad
به سمت مریوان
N
0km
25
50
100km
نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه
منطقه مورد مطالعه
مارن، ماسه سنگ، مقداری شیل
کالسیروفیت، بخش رسی قهوای تا خاکستری
کنگلومرای پلی ژنیک، ماسه سنگ، قرمز
شیل، شیل ماسه دار، ماسه سنگ با تداخل آهک ریزدانه اتشفشانی آندزیتی تا بازالتی با ساختمان بالشتی
آذراواری آندزیتی، بیشتر توف بلورین و سنگی
آهک خاکستری تیره، لایه ای یا توده ای
سنگ آهک بیولوژیک با رخساره پلاتفرم
آهک به طور متناوب با سیلیس و رادیولاریت
رسوبات سیلیسی، رادیولاریت
(ژوراسیک تا کامبرین احتمالا از تریاس بالایی)
زاگرس چین‌خورده
مارن، ماسه سنگ، کنگلومرا
آهک نازک تا متوسط لایه
دولومیت تیره، آهک دولومیتیخاکستری، کنگلومرا، شیل کربن دار
آهک دولومیتی و آهک لایه ای با لایه های نازک گچ
سنگهای نفوذی
گابرو تا دیوریت با سنگ های الترابازیک ائوسن بالا- الیگوسن زیرین
گرانودیوریت بیوتیت دار، پالئوسن بالا
سنگهای الترابازیک، دونیت، پیروکلست، سرپانتین
OLIGO-MIOCENE
PALEOCENE EOCENE
MESOZOIC
CRET.
JURAS.
TRIAS.

شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سد آزاد و سازه‌های وابسته.(شرکت توسعه منابع آب، ۱۳۸٦)

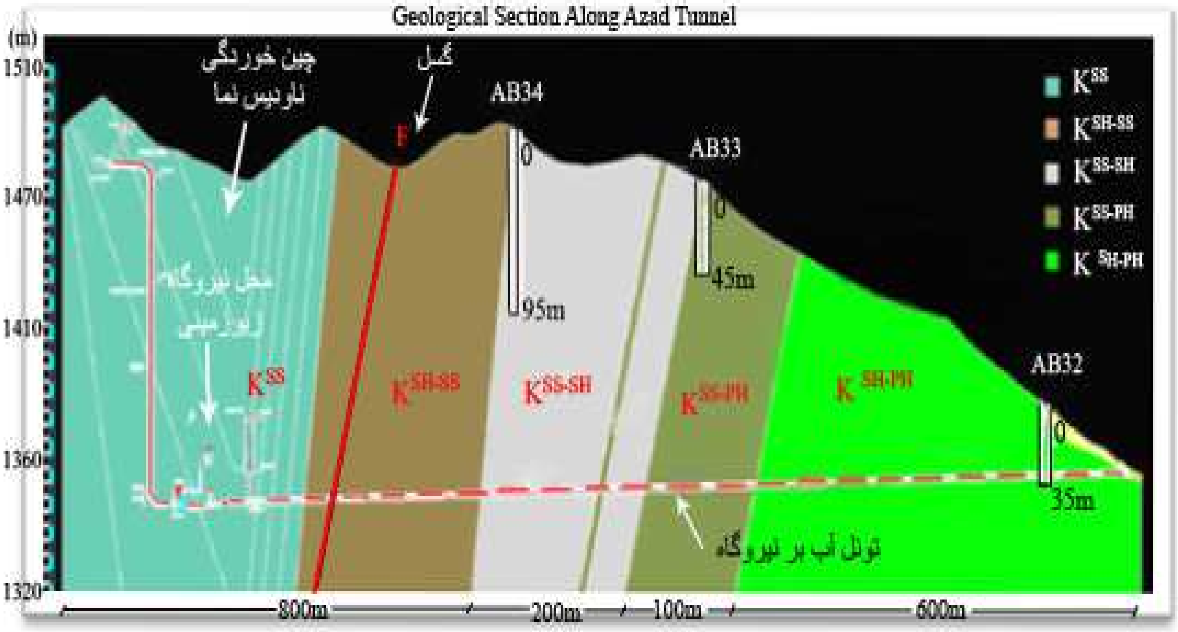
توده‌سنگ‌های محل، مربوط به مزوزوئیک و در کرتاسه بالایی قرار دارند واحدهای مختلف مسیر تونل در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه ماسه‌سنگ، شیل و فیلیت در هر پنج زون به‌صورت مشترک وجود دارد و در هر قسمت یکی از آن‌ها مقدار غالب را داشته تصمیم گرفته شد که منطقه در ۳ زون بررسی شود (جدول ۱).

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده مشخص گردید که واحدهای مورد بررسی هوازدگی کمی داشته و عموماً تازه بوده‌اند. همچنین مقاومت تراکمی تک‌محوره در محدوده‌ای بین ۲۵ تا ۳۰ مگاپاسگال قرار داشته است. شرایط ناپیوستگی زون‌های موردنظر نیز به‌صورت نامنظم، موج‌داری اندک و در برخی نقاط مسطح بوده است. فاصله ناپیوستگی‌ها نیز حداقل ۵۰ میلی‌متر تا حداکثر ۲ متر متغیر بوده است. بازشدگی درزه‌ها نیز در محدوده‌ای بین ۱ تا ۱۰ میلی‌متر قرار داشته که عموماً توسط کلسیت، لوم و اکسید آهن پرشده و در برخی مناطق نیز بدون پرشدگی بوده است.

در مسیر تونل تنها یک گسل بزرگ با روند ۷۵/۰۵۵ مشاهده‌شده است. هرچند که به‌صورت 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 چین‌خوردگی ناودیس نما مشاهده شده است که با توجه به قرارگیری آن در انتهای مسیر تونل آب‌بر و عدم وجود گمانه در این محدوده امکان اظهارنظر قطعی در مورد مکانیسم واقعی آن نبوده است.

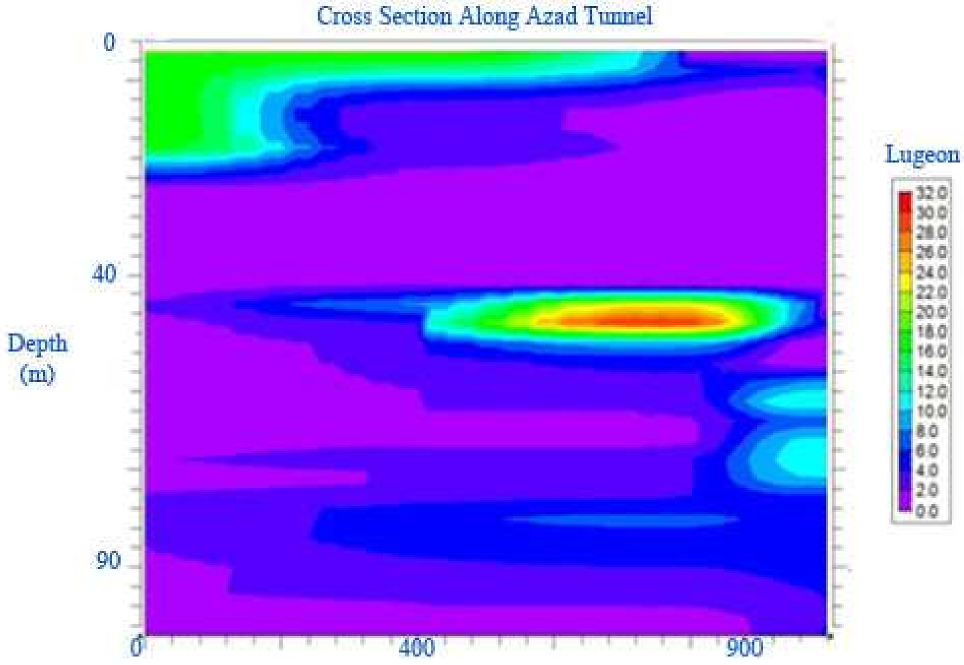
جدول ۱. زمین‌شناسی مهندسی واحدهای مختلف

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

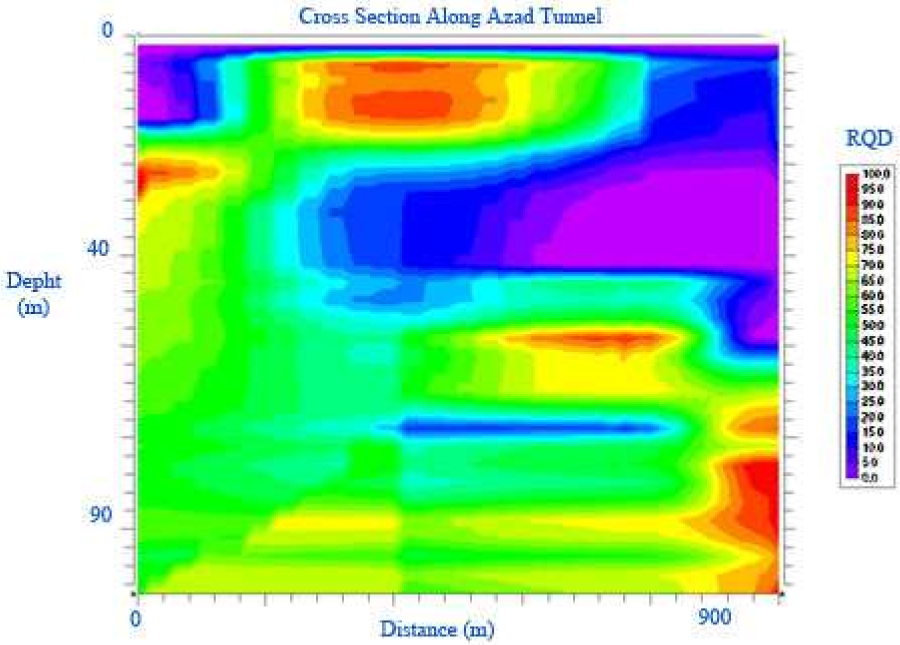

Geological Section Along Azad Tunnel
(m)
1510
1470
1410
1360
1320
چین خوردگی ناودیس نما
گسل
F
AB34
0
95m
AB33
0
45m
AB32
0
35m
محل نیروگاه زیرزمینی
تونل آب بر نیروگاه
K^{SS}
K^{SH-SS}
K^{SS-SH}
K^{SS-PH}
K^{SH-PH}
800m
200m
100m
600m

شکل ۳. واحدهای مختلف مسیر تونل

همبستگی بین اطلاعات گمانه‌ها نشانگر این موضوع بوده است که در اعماق سطحی به دلیل هوازدگی، شاخص کیفیت سنگ پائین 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 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 ٤ و ٥ روند این تغییرات در امتداد مسیر تونل آب‌بر نشان داده شده است.



شکل ٤. مقطع عرضی تغییرات لوژان در امتداد محور تونل



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

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 می شود 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.

٤. طبقه‌بندی توده‌سنگ مسیر تونل

٤-١. طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ مسیرتونل آب‌بر به روش GSI

این طبقه‌بندی توسط Hoek & Brown (1997) ابداع شده است. با توجه به شرایط توده‌سنگ‌های مسیر تونل، این توده‌سنگ‌ها ازلحاظ ساختاری به‌صورت بلوکی تا خیلی بلوکی، قفل‌شدگی قطعات خوب، کمی دست‌خورده و سطوح درزه‌ها زبر با هوازدگی خیلی کم تعریف شدند (شکل ٦). به این ترتیب دامنه مقادیر GSI در حدود ٦۰-٤۵ تعیین شد. نتایج این طبقه‌بندی در جدول ۲ نشان داده شده است

جدول ۲. طبقه‌بندی GSI برای سه قطعه از مسیر تونل

منطقه	GSI
ورودی	٤۵-۵۰
میانه	۵۰-٦۰
خروجی	۳۵-٤۵

شکل ٦. نمونه دسته درزه‌های مسیر تونل

٤-۲. طبقه‌بندی مسیر تونل به روش RMR

یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین طبقه‌بندی‌های ارائه شده سیستم RMR است که توسط بنیاوسکی در سال ۱۹۷٤ 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 (Bieniawaski, 2001).

جدول ۳. طبقه‌بندی RMR برای سه قطعه از مسیر تونل

پارامتر	**ورودی**	**میانه**	**خروجی**
مقاومت فشاری تک‌محوره	۲۵–۵۰ (MPa)	۲۵–۵۰ (MPa)	۲۵–۵۰ (MPa)
امتیاز	۲/۲	۳/۸	٤
شاخص کیفیت سنگ (درصد)	٦۰–۷۰	٦۰–۷۵	۵۵–٦۵
امتیاز	۱۱/۵	۹	۹
فاصله ناپیوستگی (میلی‌متر)	٦۰–۲۰۰	۵۵–۱۵۰	٦۰–۲۰۰
امتیاز	۷/۳	۷/۵	۸
وضعیت ناپیوستگی	سطوح نامنظم، نسبتاً زبر، جدایش کمتر از ۲.۵ و کمی هوازده	سطوح نسبتاً نامنظم، نسبتاً زبر، جدایش کمتر از ۱ و کمی هوازده	سطوح نسبتاً نامنظم، نسبتاً زبر، جدایش کمتر از ۲.۵ و کمی هوازده
امتیاز	۲۲	۲٦	۲۱
وضعیت آب زیرزمینی	خشک	خشک	خشک
امتیاز	۱٤	۱٤/۵	۱٤
جهت‌یابی ناپیوستگی	نسبتاً خوب	نسبتاً خوب	نسبتاً خوب
امتیاز	-۵	-۵	-۵
درجه‌بندی توده‌سنگ	۵۲	٦۱	۵۱

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.

۴-۳. *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 قدیمی‌تر MRMR که توسط خودشان در سال ۱۹۹۰ ارائه‌شده 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 قدیمی‌تر آن شامل 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.

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$^{(-۵)}$	۱/۱*۱۰$^{(-۶)}$	−۹/۵۴	۰
(g/cm^3)γ_d	−۰/۰۳۸	۰/۰۰۴۸	−۸/۰۲	۰
(Mpa)UCS	−۶/۱*۱۰$^{(-۵)}$	۳/۵۴*۱۰$^{(-۵)}$	−۱/۷۳	۰/۰۹۳
(Mpa)σ_t	−۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۱۸	−۲/۴۳	۰/۰۲

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 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 بررسی‌شده است.

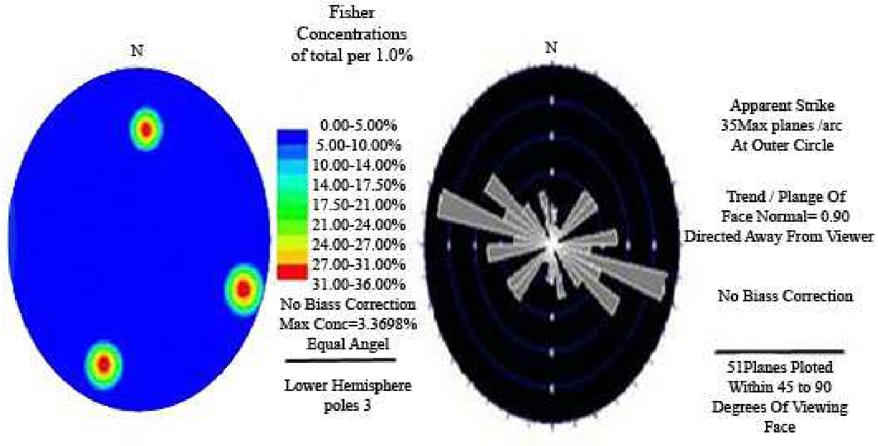
۵-۱. *تحلیل ناپایداری ساختاری*

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

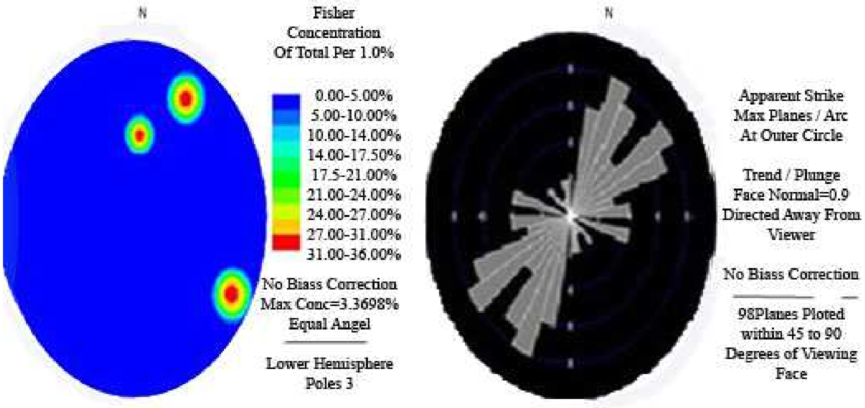
گوه‌های سنگی یکی از معمول‌ترین این مخاطرات است (Khanlari et al., 2012).

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 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).

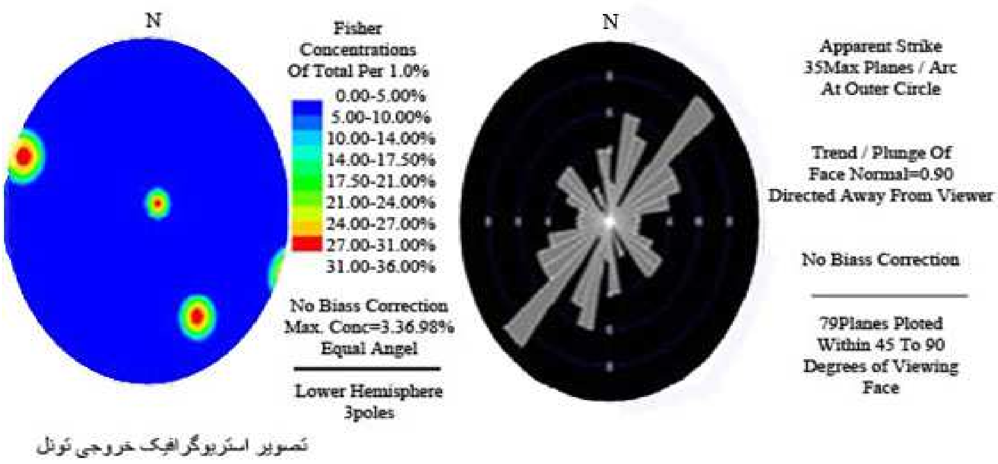
در مجموع ۲۲۷ درزه در محدوده مورد مطالعه برداشت شده است. در ورودی ۵۱ درزه، در مسیر تونل ۹۸ درزه و در انتهای مسیر ۷۹ درزه مورد بررسی قرارگرفته است. تصاویر استریوگرافی مطالعه شده برای سه قسمت، در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به جهت‌یابی درزه‌ها این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که احتمال تشکیل گوه‌های سنگی و ریزش و ناپایداری محتمل بوده است.



تصویر استریوگرافیک ورودی تونل



تصویر استریوگرافیک میانه تونل



تصویر استریوگرافیک خروجی تونل

شکل۷. تصاویر استریو گرافی ورودی، میانه و خروجی تونل آب بر

همان‌گونه که از جدول ٥ پیداست اکثر گوه‌های تشکیل‌شده در ورودی و خروجی شرایط ناپایدار و نیمه پایداری دارند که خطر بالای حرکت آن‌ها و احتمال واژگونی این گوه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس تحلیل انجام شده توسط نرم‌افزار تمام گوه‌های تشکیل‌شده در سقف دچار واژگونی شده‌اند و همچنین گوه‌های تشکیل‌شده در دیواره‌ها بر روی نزدیک‌ترین درزه موجود می‌لغزند و همچنین گوه‌های تشکیل‌شده در کف تونل نیز حالت (Squeezing) و بالاآمدگی نشان می‌داده‌اند.

جدول ٥. نتایج تحلیل صورت گرفته و احتمال تشکیل گوه‌ها در طول مسیر

محل گوه	شماره گوه	وزن گوه	موقعیت	وضعیت پایداری	F.S
ورودی	۳	۰/۳۸٥	Upper right	لغزش روی درزه ۱	۱/٥٦
	٥	۰/۰۰۲	left	لغزش روی درزه ۳	٤/۰۸
	٦	۱/۸۸	Upper left	سقوط	۰/۰۰
	۷	۳/۹۹٤	Near end	لغزش روی درزه ۲	۱/۱٦
	۸	۳/۹۹٤	Far end	لغزش روی درزه ۱ و ۳	۱/٤۲
مسیر	۳	۰/۲٥۷	Upper right	لغزش روی درزه ۱	۲/۷
	٤	۰/۲٥۷	Lower left	لغزش روی درزه ۲ و ۳	٤/۷
	٦	۱۳/٤۸	Upper left	سقوط	۰/۰۰
	۷	۲/۳۷	Near end	لغزش روی درزه ۱ و ۳	٥/۷٤
	۸	۲/۳۷	Far end	لغزش روی درزه ۲	۲/۰٥
خروجی	٤	۰/۸٥٤	Lower left	لغزش روی درزه ۲	۰/٥٥
	٥	۱/۰۱	left	لغزش روی درزه ۳	۰/٤۷
	٦	۰/۳۰۲	Upper left	سقوط	۰/۰۰
	۷	۱۲/۸۲	Near end	لغزش روی درزه ۲ و ۳	۱/۲٥
	۸	۱۲/۸۲	Far end	لغزش روی درزه ۱	۲/۷۹

۵-۲. 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 مچاله شوندگی و انفجار سنگ را نام برد که همواره از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی مهندسین بوده است.

پدیده مچاله شوندگی 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 حفاری‌شده 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 مچاله شوندگی غیرخطی در اطراف تونل‌های دایروی، مچاله شوندگی 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 مچاله شوندگی نیست و هر جا که توده‌سنگ حاوی رس باشد با افزایش جذب آب متورم می‌شود.

تونل‌سازی در زمین‌های مچاله شونده باعث تأخیر طولانی در احداث یک پروژه تونل سازی و تحمیل هزینه‌های اقتصادی زیادی می‌شود. موارد موفقیت‌آمیز نیز با درک درست از مسائل مچاله شوندگی 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 حفرشده در حدفاصل سال‌های ۱۸۶۰ الی ۱۹۱۰ قابل ذکر می‌باشد (Barla, 2002).

اما پدیده انفجار سنگ از دیگر چالش‌های پیش رو در محیط های 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 گرنه 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).

۵-۲-۱. بررسی پتانسیل مچاله شوندگی

۵-۲-۱-۱. روش‌های تجربی

روش‌های تجربی بر پایه روش‌های طبقه‌بندی، ارائه شده‌اند. با وجود اینکه مسئله مچاله شوندگی 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 ٦ خلاصه شده است که به کمک جدول ۷ نیز طبقه‌بندی نهایی در این دسته‌ها صورت می‌گیرد.

جدول ٦. طبقه‌بندی رفتار توده‌سنگ طبق روش‌های تجربی

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

جدول ۷. طبقه‌بندی رفتار توده‌سنگ طبق روش‌های تجربی

شرایط مچاله شوندگی	همگرایی برحسب قطر تونل
مچاله شوندگی ملایم	۱٪- ۳٪
مچاله شوندگی متوسط	۳٪- ۵٪
مچاله شوندگی زیاد	> ۵٪

۵-۲-۱-۲. روش‌های نیمه تجربی

این روش‌ها نیز شاخص‌هایی را جهت تعیین پتانسیل مچاله شوندگی تونل ارائه می‌دهند. از انواع دیگر این روش‌ها Jethwa et al. (1984)، Aydan et al. (1993) و Hoek and Marinos (2000) را می‌توان نام برد. خلاصه موارد اشاره شده در جدول ۷ و ۸ بیان شده است.

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 مچاله شوندگی 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	۱-۲/۵	۲/۵-۵	۵-۱۰	> ۱۰
شدت مچاله شوندگی روش Jethwa et al. (1984)	بدون مچاله شوندگی	مچاله شوندگی کم	مچاله شوندگی زیاد	مچاله شوندگی خیلی زیاد	مچاله شوندگی شدید
	< ۰/٤	۰/٤-۰/۸	۰/۸-۲	> ۲	
شدت مچاله شوندگی روش Aydan et al. (1993)	مچاله شوندگی زیاد	مچاله شوندگی متوسط	مچاله شوندگی ملایم	بدون مچاله شوندگی	

۵-۲-۱-۳. بررسی پتانسیل مچاله شوندگی تونل آب‌بر نیروگاه سد آزاد

بر اساس نتایج تحلیل رفتار مچاله شوندگی با استفاده از روش‌های تجربی و نیمه تجربی که توسط دانشمندان مختلف صورت گرفته شده است، محدوده مسیر تونل آب‌بر در مناطقی پتانسیل مچاله شوندگی 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.

جدول ۹. نتیجه روش‌های بررسی پتانسیل مچاله شوندگی مسیر تونل

پهنه	روباره	Goel et al. (1997)	Singh et al. (2007)	Jethwa et al. (1984)	Aydan et al. (1993)	Hoek and Marinos (2000)
۱۸۰-۱۹۰	۵۰۰	متوسط	ملایم	غیر مچاله شونده	خفیف	مچاله شوندگی کم
۴۵۰-۶۰۰	٤٤۰	متوسط	شدید	شدید	متوسط	مچاله شوندگی خیلی زیاد
٦۳۰-٦۵۰	٤۳۰	شدید	متوسط	متوسط	متوسط	مچاله شوندگی زیاد
٦۹۰-٦۹۷	۳۸۰	شدید	متوسط	متوسط	غیر مچاله شونده	مچاله شوندگی کم
۹۰۰-۱۰۰۰	۳۳۰	متوسط	ملایم	ملایم	خفیف	مچاله شوندگی کم
۱۱۵۰-۱۲۰۰	۳۲۰	ملایم	ملایم	متوسط	خفیف	مچاله شوندگی زیاد
۱۲۰۰-۱۲٤۰	۳۰۰	ملایم	شدید	غیرمچاله شونده	متوسط	مچاله شوندگی خیلی زیاد
۱۲۵۰-۱۲٦۰	۲۸۰	متوسط	متوسط	ملایم	خفیف	مچاله شوندگی زیاد
۱٦۰۰-۱۷۵۰	۲۷۰	متوسط	ملایم	متوسط	زیاد	مچاله شوندگی کم

۵-۲-۲. 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 کوازنیوزسکی 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

روش	رابطه	توضیحات
معیار انرژی الاستیک خطی (Kwasniewski, 1994)	PES=$\frac{\partial^2}{2E}$	∂، تنش و E کرنش
معیار تنش مماسی (Wang and Park, 2001)		نسبت تنش مماسی به مقاومت فشاری تک‌محوره
معیار تردی (Hsiung, 2001)	B=$\frac{\partial_c}{\partial_t}$	نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره به مقاومت کششی
معیار تنش‌ها (**رحیم‌دل و باقر پور، ۱۳۹۱**)	α=$\frac{\partial_c}{\partial_1}$	نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره به تنش اصلی حداکثر

جدول ۱۱. **طبقه‌بندی پدیده انفجار سنگ**

PES	۵۰<	۱۰۰-۵۰	۱۵۰-۱۰۰	۲۰۰-۱۵۰	۲۰۰>
شدت انفجار	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
	۰/۳<	۰/۵-۰/۳	۰/۷-۰/۵	۰/۹-۰/۷	۰/۹>
شدت انفجار	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید
B	٤۰<	۲٦/۷-٤۰	۱٤/۵-۲٦/۷	۱٤/۵>	
شدت انفجار	بدون انفجار	ضعیف	متوسط	شدید	

۵-۲-۲-۱. 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. به‌طورکلی 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
٤۵۰–٦۰۰	متوسط	شدید	متوسط	متوسط
٦۳۰–٦۵۰	شدید	بدون انفجار	متوسط	زیاد
٦۹۰–٦۹۷	شدید	متوسط	شدید	زیاد
۹۰۰–۱۰۰۰	متوسط	بدون انفجار	متوسط	متوسط
۱۱۵۰–۱۲۰۰	شدید	بدون انفجار	شدید	زیاد
۱۲۰۰–۱۲٤۰	متوسط	بدون انفجار	ضعیف	خیلی کم
۱۲۵۰–۱۲٦۰	ضعیف	متوسط	متوسط	کم
۱٦۰۰–۱۷۵۰	متوسط	بدون انفجار	ضعیف	خیلی کم

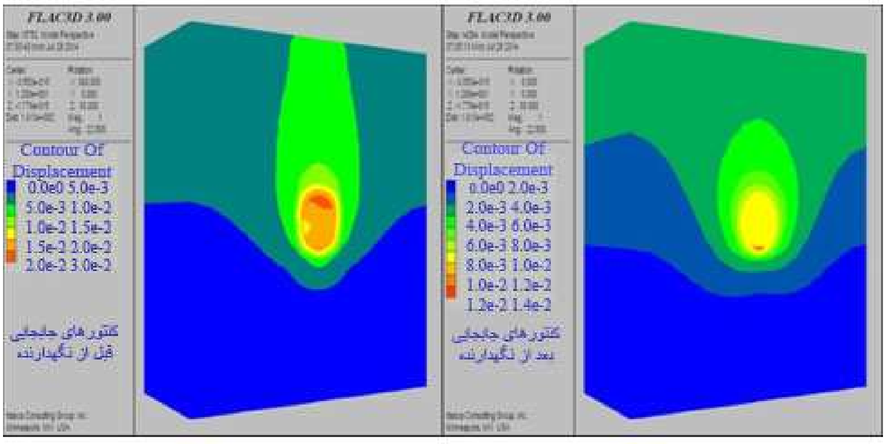
٦. تعیین حداکثر گام مجاز پیشروی

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 قرارگرفته 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) ۱/٤۲ سانتی مترو کرنش برشی مجاز (γc) میانگین ۰/٤۷ 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 ۱٤ 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 آب بر 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

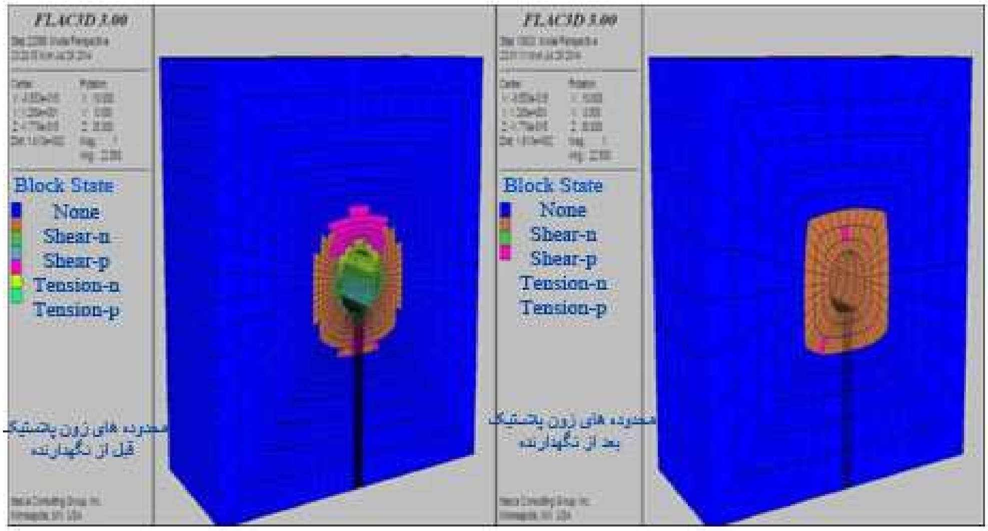
نام واحد	مدول حجمی (GPa)	مدول برشی (GPa)	مقاومت کششی (KPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	جرم حجمی (MN/m3)	زاویه اتساع (درجه)
ماسه‌سنگ	۳/۳۳	۲/۳۹	۳۰۰	۳۳	۰/۰۲۶	۵/۷
فیلیت	۱/۹۶	۰/۹۵۹	۲۵۰	۲۸	۰/۰۲۷	۲/۸


FLAC3D 3.00
Contour Of Displacement
0.0e0 5.0e-3
5.0e-3 1.0e-2
1.0e-2 1.5e-2
1.5e-2 2.0e-2
2.0e-2 3.0e-2
کنتورهای جابجایی قبل از نگهدارنده
FLAC3D 3.00
Contour Of Displacement
0.0e0 2.0e-3
2.0e-3 4.0e-3
4.0e-3 6.0e-3
6.0e-3 8.0e-3
8.0e-3 1.0e-2
1.0e-2 1.2e-2
1.2e-2 1.4e-2
کنتورهای جابجایی بعد از نگهدارنده

شکل ۸. میزان جابجایی گام 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	۰/٤	√
۳	۱/۳	۰/٤	√
٤	۳/۵	۰/٦	×

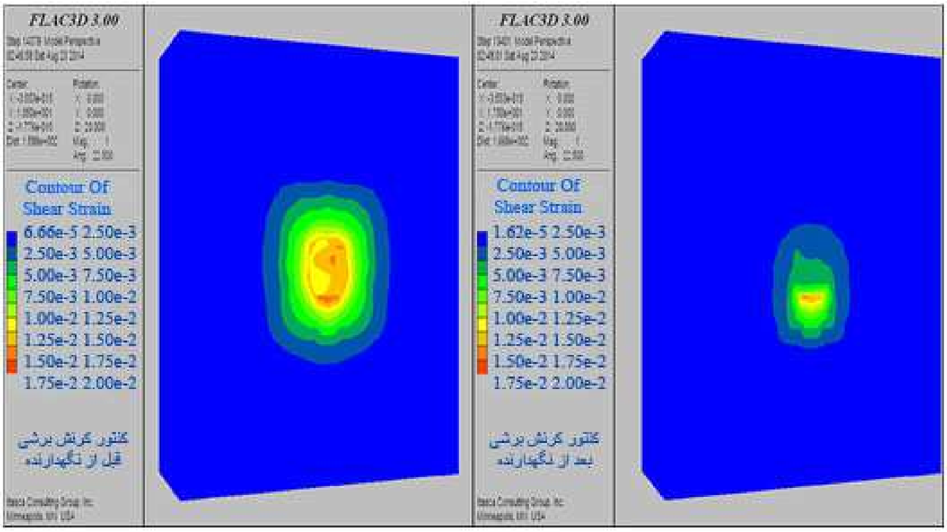

FLAC3D 3.00
Block State
None
Shear-n
Shear-p
Tension-n
Tension-p
محدوده های زون پلاستیک قبل از نگهدارنده
FLAC3D 3.00
Block State
None
Shear-n
Shear-p
Tension-n
Tension-p
محدوده های زون پلاستیک بعد از نگهدارنده

شکل ۹. عدم‌تغییر در زون پلاستیک قبل و بعد از اعمال نگه‌دارنده در گام ٤ متری در ورودی تونل

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 ١٥ مشاهده می‌گردد. با توجه به نتایج نرم‌افزار برای محدوده فیلیتی، حداکثر گام مجاز پیش روی ٢ متر تعیین شده است تغییر در زون پلاستیک در این گام در شکل ١٠ 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.

جدول ١٥. نتایج حاصل از گام‌های پیش روی مختلف در خروجی تونل

گام (متر)	جابجایی (سانتی‌متر)	کرنش برشی (درصد)	
١	١	٠/٣٨	√
٢	١/٤	٠/٤٥	√
٣	٢	٠/٧٥	×



شکل ١٠. تغییر در زون پلاستیک قبل و بعد از نگه‌دارنده در گام ٢ متری خروجی تونل

٧. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر ابتدا به بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی در طول مسیر تونل در نرم‌افزار Rockwork 14 پرداخته‌شده 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 ٤٥ متری را می‌توان به فراوانی درزه‌ها نسبت داد. عدم تبعیت این دو پارامتر از یکدیگر در اعماق ٨٠ متری ناشی از پرشدگی درزه‌ها و عدم ارتباط هیدرولیکی بین دستگاه‌های ناپیوستگی است که سبب افزایش کاذب شاخص کیفیت سنگ و از سمتی دیگر سبب کاهش میزان نفوذپذیری شده است.

همچنین بر اساس طبقه‌بندی صورت گرفته به سه روش RMR, GSI وIRMR نتیجه گرفته شد که سنگ‌های مسیر تونل در ورودی و خروجی در شرایط نامناسبی قرار دارند.

انجام مطالعات بر روی بیش از ٢٢٠ 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

حاصل شد که پدیده انفجار سنگ در ورودی تونل محتمل‌تر از سایر نقاط بوده است و احتمال پدیده مچاله شوندگی 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 ١٤ و ١٥ بیان شده است.

نهایتاً اینکه با توجه به شرایط بیان‌شده حداکثر گام مجاز پیشروی برای ورودی ٣ متر و برای خروجی تونل آب‌بر حداکثر ٢ متر محاسبه‌شده است. در گام‌های بیشتر از مقادیر 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 تاکید 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 معرفی‌شده 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.

منابع

اجل لوئیان، ر.، دادخواه، ر.، هاشمی، م.، ١٣٨٧. تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگه‌دارنده تونل انحراف سد خرسان ٣. مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ١، ٣٧-٤٥.

خانی، ع.، رسولی، م.، باغبانان، ع.، ١٣٩٠. بررسی سه‌بعدی تأثیر هندسه تونل در محاسبه گام پیشروی مجاز در تونل‌های نعل اسبی. نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل فضاهای زیرزمینی برای توسعه پایدار، تهران، ایران.

رحیم‌دل، م.، باقرپور، ر.، ١٣٩١. طراحی نگه‌دارنده اولیه تونل انتقال آب گلاب با تأکید بر خطرات زمین‌شناسی. فصل‌نامه زمین‌شناسی کاربردی، شماره ٤، ٣٢٣-٣٣٤.

سامانی، ر.، و شهابی، م.، ١٣٨٨. آنالیز پایداری و تخمین نگهداری تونل‌های آب‌رسان سد و نیروگاه سیاه‌بیشه با روشVNIMI. فصل‌نامه کیسون، شماره ٤٠.

شرکت توسعه آب و نیروی ایران، ١٣٨٦. گزارش زمین‌شناسی مهندسی طرح سد مخزنی آزاد.

مدنی، ح.، ١٣٨٣. تونل سازی تحلیل پایداری، جلد سوم انتشارات دانشگاه امیرکبیر.

مهدوی، س.، هاشمی م.، آیتی، ف.، ١٣٨٨. بررسی پتانسیل مچاله شوندگی در تونل انتقال آب بهشت‌آباد، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه یزد.

وفائیان، م.، ١٣٨٤. اطلاعات اجرائی 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): l37-163.

Barla, G., 2002. Tunnelling under squeezing rockConditions. In: Kolymbas, D. (ed.), Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling, pp. 169-268.

Bieniawaki, 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 charactrization: A comparison of the MRMR and IRMR classification systems, surface minning.The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Surface Mining, pp. 217-223.

Evrim 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. InstituE 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.