

تحلیل پایداری و پیشنهاد سیستم نگهداری در تونل‌های انحراف آب سد مشمپا زنجان با استفاده از روش‌های عددی، تجربی و همگرایی - همجواری

مقاله پژوهشی

معین بهادری^{۱*}؛ عماد خراسانی^۲

۱- استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن و عمران، مجتمع آموزش عالی گناباد، moein.bahadori@gmail.com

۲- دانش آموخته دکتری تخصصی؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس فنی، دانشگاه تهران، emad.khorasani@ut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶

شماره صفحات: ۲۱۷ تا ۲۳۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2023.11732.1448

واژگان کلیدی	چکیده
تحلیل پایداری تونل سیستم Q سیستم RMR نرم‌افزار UDEC همگرایی - همجواری	بررسی پایداری فضاهای زیرزمینی و طراحی سیستم نگهداری مناسب از مهم‌ترین مراحل در فرآیند حفر تونل است. روش‌های مختلفی برای بررسی وضعیت پایداری تونل‌ها وجود دارد. در این مقاله به منظور تحلیل پایداری و پیشنهاد سیستم نگهداری مورد نیاز تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان از روش‌های عددی، تجربی و همگرایی - همجواری استفاده شده است. این تونل‌ها به قطر ۱۰ متر، فاصله افقی ۲۰ متر و اختلاف ارتفاع ۶ متر نسبت به هم قرار دارند. با توجه به شرایط درزه‌داری منطقه و تأثیر آن بر وضعیت پایداری دو تونل، از نرم‌افزار عددی المان مجزای UDEC استفاده و نتایج آن با روش‌های تجربی RMR و Q مقایسه شده است. همچنین با روش همگرایی - همجواری پایداری تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که استفاده از سیستم نگهداری شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر به عنوان نگهدارنده موقت پایداری تونل را تضمین می‌کند و مقدار حداکثر جابجایی قائم در سقف تونل‌ها ۸/۶۴ و ۹/۱۶ میلی‌متر است. ضریب اطمینان سیستم نگهداری برابر ۳/۵ و ۲/۰۲ با روش همگرایی - همجواری برای تونل‌ها برآورد شد.

۱- مقدمه

تحلیل عددی پایداری تونل‌ها بکار گرفته‌اند. کاندال و هارت (۱۹۹۳) تأثیر حفاری تونل در محیط سنگی درزه‌دار را با استفاده از روش‌های عددی بررسی کرده‌اند. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که عکس‌العمل مدل به خصوصیات ژئومکانیکی و معیار رفتاری درزه وابسته است (Cundall & Hart, 1992). جانسون و کولا (۱۹۹۵) با استفاده از روش‌های عددی المان محدود در فضای سه‌بعدی، پایداری یک فضای زیرزمینی را تحلیل و نتایج آن را با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه کرده‌اند (Johansson &

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌های انحراف آب در احداث سدهای خاکی و بتنی اهمیت زیادی دارد. استفاده از روش‌های تجربی در شرایط زمین‌شناسی مشابه، به منظور پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ و انتخاب سیستم نگهداری مورد نیاز بسیار مفید هستند (Grimstad, 1993). علاوه بر روش‌های تجربی، تحلیل عددی یکی از روش‌های بررسی و مطالعه تحلیل پایداری شیب و فضاهای زیرزمینی است. در این زمینه محققین مختلف روش‌های متفاوتی در

* خراسان رضوی؛ گناباد؛ نبش میدان سرباز؛ ساختمان غفاری؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ گروه مهندسی معدن و عمران؛ کدپستی: ۹۶۹۱۹۵۷۶۷۸؛ شماره‌ی تلفن: ۰۵۱-۵۷۲۲۹۷۰۲؛ دورنگار: ۰۵۱-۵۷۲۵۵۹۶۹

تجربی پیش‌بینی نشت جریان آب به تونل‌های زیرزمینی (Goodman, 1964) از مدل‌سازی عددی در UDCE استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج این بررسی اصلاحات اعمال شده در روابط تجربی، موجب شد تا نتیجه بدست آمده از آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در تونل Bergamo District تطابق قابل قبولی داشته باشد (Gattinoni & Scesi, 2010; Goodman, et al., 1964). سون و همکاران (۲۰۱۱) در پیش‌بینی تأثیر نشست زمین حاصل از حفاری تونل‌ها بر انواع سازه‌های سطحی از نرم‌افزار المان مجزای UDEC استفاده کرده‌اند. در این بررسی سازه‌های آجری، سازه‌های قاب باز، سازه‌های قاب دار پر شده با آجر مدل‌سازی شده و نتایج این بررسی نشان می‌دهد که میزان تأثیر نشست زمین بر توزیع شکستگی‌ها بسته به نوع سازه متفاوت و شرایط خاک وابسته است (Son & Cording, 2011). رحمانی و همکاران (۲۰۱۲) برای پیش‌بینی تنش‌ها و تغییرشکل‌های تودسنگ در اطراف تونل تاج سد شهریار ایران از نرم‌افزار UDEC استفاده کرده‌اند. در این بررسی نتایج بدست آمده از تحلیل عددی با مقادیر پیشنهادی روابط تجربی در تخمین سیستم نگهداری انطباق مناسبی را نشان می‌دهد (Rahmani, et al., 2012). لی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تحلیل عددی در نرم‌افزار المان مجزای UDEC، پاسخ هیدرومکانیکی مغاره‌های زیرزمینی تأسیسات نفتی در محیط اشباع را بررسی کرده‌اند. در این بررسی اطلاعات ناپیوستگی‌ها و ماده سنگ از یک نمونه مطالعاتی در کشور چین استفاده شده است. بر اساس نتایج تحلیل عددی حداکثر مقدار نشت آب و نشست تاج مغار به ترتیب $0.15m^3/d$ و ۳۴ میلی‌متر بوده که با مطالعات میدانی تطابق خوبی نشان داده هرچند که مقدار آن‌ها از مقادیر پیش‌بینی شده با روابط تجربی کمتر هستند (Li, et al., 2014). گائو و همکاران (۲۰۱۴) در پیش‌بینی شکست برشی سقف تونل‌های حمل و نقل معادن زیرزمینی زغال‌سنگ از نرم‌افزار UDEC استفاده کرده‌اند. در این پژوهش یک روش خلاقانه برای پیش‌بینی موقعیت آغاز و رشد ترک‌های برشی در سقف ارائه شده که بر اساس آن نقطه آغاز ترک‌ها در گوشه‌های سقف پیش‌بینی شده که این ترک‌ها به مرکز و ترازهای بالاتر توده‌سنگ سقف گسترش می‌یابند. بر اساس نتایج این بررسی نتایج

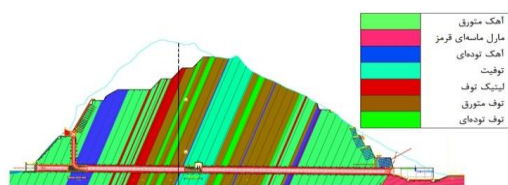
(Kuula, 1995). یوشیدا و همکاران (۱۹۹۵) با استفاده از روش محیط‌های پیوسته پایداری یک مغار زیرزمینی را در یک توده‌سنگ درزه‌دار تحلیل کرده‌اند (Yoshida, et al., 1995). بهاسین و هوگ (۱۹۹۸) با استفاده از مدل‌سازی عددی، وضعیت پایداری تونل‌ها را با سیستم نگهداری و بدون سیستم نگهداری بررسی کرده‌اند (Dasgupta, et al., 1999). داسگوپتا و همکاران (۱۹۹۹) به منظور تحلیل پایداری یک مغار نیروگاه زیرزمینی در هند نتایج شبیه‌سازی‌های عددی دو بعدی و سه‌بعدی را با اندازه‌گیری‌های صحرائی مقایسه کرده‌اند (Bhasin & Høeg, 1998). سیتارام و لاتا (۲۰۰۲) در بررسی پایداری معادن فلزی و نیروگاه‌های زیرزمینی، فضای محیط‌های پیوسته را مدل‌سازی کرده‌اند (Sitharam & Latha, 2002). فان و همکاران (۲۰۰۴) برای بررسی وضعیت پایداری یک تونل در محیط سنگی درزه‌دار در اثر بارگذاری‌های دینامیکی، از نرم‌افزار المان مجزای UDEC استفاده کرده‌اند (Jiao, et al., 2005). ژیاو و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای ۳DEC نحوه انتشار ترک در دیوارهای جانبی فضای زیرزمینی در اثر اعمال بارگذاری دینامیکی را تحلیل و بررسی نموده‌اند (Jiao, et al., 2005). هائو و آزام (۲۰۰۵) با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC، فاکتورهای بحرانی شکست در فضاهای زیرزمینی را بررسی کرده‌اند (Hao & Azzam, 2005). ژیا و همکاران (۲۰۰۷) به منظور تحلیل عددی یک مغار زیرزمینی حفر شده در توده‌سنگ متورق، از روش تحلیل المان محدود استفاده کرده‌اند (Xia, et al., 2007). کای (۲۰۰۸) نتایج تحلیل عددی حفاری تونل با روش‌های المان محدود در نرم‌افزار Phase2 و المان مرزی در نرم‌افزار FLAC را مقایسه کرده است (Cai, 2008). اوگین و فو (۲۰۰۹) در تحلیل پایداری تونل‌های دایروی نتایج مدل‌سازی عددی به دو روش المان محدود (نرم‌افزار Plaxis) و المان مجزا (نرم‌افزار UDEC) استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده از این بررسی از آنجاکه جهت‌یابی سیستم‌های ناپیوستگی نقش حیاتی در تحلیل پایداری تونل‌ها دارد، از این منظر روش المان مجزا بر روش‌های دیگر تحلیل پایداری برتری دارد (Evgin & Fu, 2009). گاتینونی و شسی (۲۰۱۰) به منظور اصلاح روابط

استفاده کرده‌اند. در این بررسی از تاریخچه زلزله مکزیک در سال ۱۹۸۵ بعنوان بار ورودی استفاده شده و با نتایج آزمایشگاهی میز لرزان مقایسه شده است. وارما و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر پارامترهای تنش-های برجا، زاویه درزه‌ها، سختی درزه‌ها و زاویه اصطکاک درزه‌ها را بر تغییر شکل توده‌سنگ و پایداری تونل بررسی کرده‌اند که نشان می‌دهد با افزایش میزان سختی درزه‌ها، میزان تغییر شکل توده‌سنگ بصورت نمایی کاهش پیدا می‌کند (Varma, et al., 2019). کاشیاری و فوتای (۲۰۲۰) با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی در محیط المان مجزا، وضعیت پایداری تونل مونته سکو در برزیل را بررسی کرده‌اند. در این بررسی با استفاده از برداشت‌های میدانی توده‌سنگ‌های محدوده تونل به دو بخش تقسیم شده و با استفاده از شاخص‌های حجم کل بلوک تسلیم شده، متوسط جابجایی در جبهه کار تونل درصد لغزش روی سطوح ناپیوستگی در جبهه کار تونل وضعیت پایداری تونل در اثر بارگذاری‌های مکرر ناشی از حمل و نقل ریلی بررسی شده است (Cacciari & Futai, 2021). سان و همکاران (۲۰۲۱) در تحلیل پایداری تونل عمیق در کشور چین از نرم‌افزار UDEC استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج این بررسی شکستگی‌ها در تونل‌های عمیق و تحت تنش‌های برجای زیاد در کف و سقف آغاز شده و در توده‌سنگ اطراف سازه گسترش می‌یابد. این شکستگی‌ها قاب‌های فولادی را تسلیم می‌کنند و لذا بجای آن‌ها استفاده از کابل‌های مهاری پیشنهاد و مدل‌سازی شد. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داده است که استفاده از کابل مهاری در کنار قاب‌های فولادی می‌تواند در جلوگیری از گسترش شکستگی‌ها و تخریب سازه بسیار موثر باشد (Sun, et al., 2021).

در این مقاله بر اساس شدت تکنونیزه بودن توده‌سنگ، تنوع ساختارهای زمین شناسی و ارتفاع روباره سنگی یک مقطع بحرانی از مسیر احداث تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان انتخاب شده است. در مرحله بعد با توجه به سیستم نگهداری اجرا شده در عملیات میدانی (شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر) وضعیت پایداری و تنش‌های حاصل از حفاری در توده‌سنگ با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC مدل‌سازی و تحلیل شده است. مقادیر بدست آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج محاسبه شده به روش

مدل‌سازی‌های عددی از منظر فعالیت میکرو ترک‌ها، تغییرات تنش در توده‌سنگ و شتاب حرکت سقف در هنگام شکست سقف انطباق مناسبی با پدیده‌های مشاهده شده و اندازه‌گیری شد دارد (Gao, et al., 2014). کرمپینوس و همکاران (۲۰۱۵) در تحلیل رخداد باکلینگ در مرز دیواره‌های فضاهای زیرزمینی عمیق در کانادا و استرالیا از نرم‌افزارهای UDEC و ۳DEC استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل عددی انطباق خوبی با تغییر شکل و مچاله شدگی توده‌سنگ‌ها در واقعیت داشته است (Karampinos, et al., 2015). چن و همکاران (۲۰۱۶) در تحلیل عددی پایداری تونل ترابری معدن دونگتائان چین از نرم‌افزار المان مجزای UDEC استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج این تحقیق با بیشترین احتمال رخداد شکست در سقف تونل بوده و با استفاده از سیستم‌های نگهداری مرکب می‌توان ضریب ایمنی پایداری تونل را افزایش داد (Chen, et al., 2016). فرهادیان و همکاران (۲۰۱۷) در تحلیل عددی نشت آب به داخل تونل انتقال آب کرج از نرم‌افزار المان مجزای UDEC استفاده کرده‌اند. در این بررسی ۱۲ مقطع مختلف از تونل مدل‌سازی شده و با روش‌های تئوری و روابط تجربی مقایسه شده است. حداکثر سرعت نشت آب در تحلیل عددی و روش‌های تجربی به ترتیب 0.0432 lit/sec/m و 0.0536 lit/sec/m بوده است که انطباق قابل قبولی را نشان می‌دهد (Farhadian, et al., 2017). بحرانی و حاجی‌جرجیو (۲۰۱۸) در بررسی تأثیر پیوسته یا ناپیوسته بودن محیط در تحلیل بارهای اعمال شده به سیستم نگهداری هنگام حفاری دریافت در معدن جرج فیشر استرالیا از نرم‌افزار المان مجزای ۳DEC استفاده کرده‌اند. در حالت پیوسته از معیار درزه‌های آبلیک و با خصوصیات توده‌سنگ معادل استفاده شده در حالیکه در مدل ناپیوسته از مدل‌سازی هندسی درزه‌ها در منطقه استفاده شده است. بر اساس نتایج این بررسی استفاده از مدل‌سازی هندسی درزه‌ها نتایج واقعی‌تری در تخمین رفتار سیستم نگهداری، میزان همگرایی تونل، عمق محدوده تسلیم سنگ به دست می‌دهد (Bahrani & Hadjigeorgiou, 2018). وارما و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی تأثیر بازهای دینامیکی بر روی تونل‌های حفر شده در توده‌سنگ درزه‌دار از نرم‌افزار المان مجزای UDEC

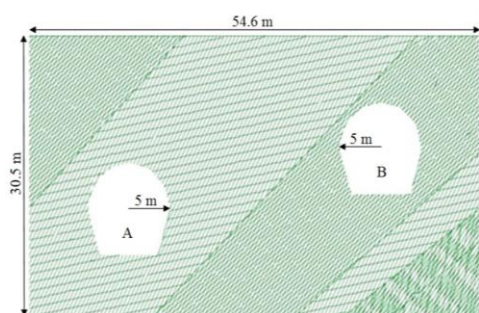
(Nicholas Barton, et al.,) Q و (Bieniawski, 1989) (1974) استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز در تخمین امتیاز سیستم‌های طبقه‌بندی Q و RMR از برداشت در رخنمون‌ها، گالری‌های دره ساختگاه و واحدهای مختلف سنگی انجام شده است. مقادیر برداشت شده نشان می‌دهد توده سنگ‌بستر در رده متوسط رده‌بندی RMR و در رده ضعیف تا متوسط سیستم طبقه‌بندی مهندسی Q قرار دارد (Nicholas Barton, et al., 1974; Bieniawski, 1989). در شکل ۲، تناوب لایه‌بندی سنگ‌بستر در مقطع طولی تونل انحراف آب سد مشمپای زنجان نشان داده شده است.



شکل ۲- مقطع طولی سیستم لایه‌بندی در منطقه حفاری تونل انحراف آب سد مشمپای زنجان

۴- مدل‌سازی عددی تونل‌های انحراف آب سد مشمپا

به منظور بررسی تأثیر وضعیت ناپیوستگی‌ها و دسته‌درزه‌های متعدد در منطقه از نرم‌افزار المان مجزای $UDEC$ استفاده شده است. تونل‌های انحراف آب سد مشمپا دارای قطر ۱۰ متر، فاصله افقی ۲۰ متر، اختلاف ارتفاع ۶ متر و طول ۴۳۵ متر بوده و مقطعی به فاصله ۱۷۶ متر از دهانه تونل مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۳، وضعیت درزه‌داری در محدوده تأثیر حفاری تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان در مقطع مورد بررسی نشان داده شده است.

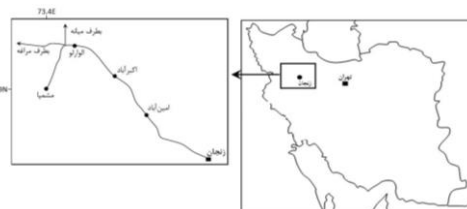


شکل ۳- توزیع درزه‌داری در محدوده تأثیر تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان

طبقه‌بندی مهندسی سنگ RMR و Q مقایسه شده است. در نهایت با استفاده از روش همگرایی-همجواری پایداری تونل‌ها با فرض ضخامت $cm10$ شاتکریت بررسی و پایداری آن‌ها با ضریب اطمینان $3/5$ و $2/02$ تأیید شده است.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

سد مشمپا در استان زنجان در فاصله ۴ کیلومتری روستای مشمپا و حدود ۱۱۵ کیلومتری غرب شهرستان زنجان واقع شده است. از دیدگاه زمین‌شناسی، محدوده مورد مطالعه پروژه سد مخزنی مشمپا در زون سنندج - سیرجان و رشته کوه‌های ایران مرکزی قرار دارد. سازندهای مختلف تشکیل‌دهنده این حوزه، انواع سنگ‌های رسوبی، آذرین، دگرگونی پرکامبرین تا عهد حاضر را شامل می‌شود. در ساختگاه سد مشمپا، رودخانه قزل‌اوزن از سمت غرب به شرق جریان دارد و دره نسبتاً متقارنی را در واحدهای سنگ آهکی، مارنی و پیروکلاستیک قم حفر کرده است. این رودخانه به عنوان عمیق‌ترین زهکش طبیعی، زهکشی دیواره‌های دره ساختگاه را انجام می‌دهد. سطح آب‌های زیرزمینی منطقه احداث سد، بین ۱۱۷۹ تا ۱۱۹۷ متر متغیر بوده و بالاتر از تراز کف دره ساختگاه با ارتفاع ۱۱۷۱ متر قرار دارد (Mobini, et al., 2006). در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به سد مشمپا نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی سد مشمپا در استان زنجان

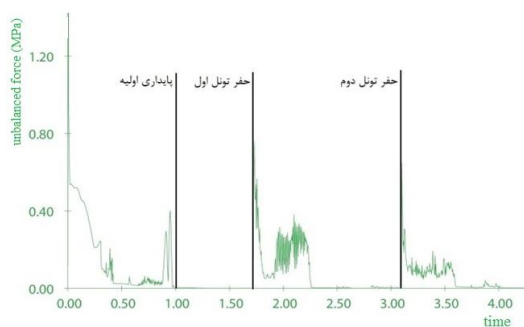
۳- خصوصیات ژئومکانیکی منطقه حفر تونل

ساختگاه سد مشمپا شامل سیستم لایه‌بندی متناوب سنگ‌های آهک توده‌ای، آهک متورق، توف لیتیک، توف متورق، توف توده‌ای و توفیت است. متوسط شاخص کیفی توده‌سنگ در منطقه ۵۰ تا ۶۰ درصد بوده و توده سنگ‌بستر در رده متوسط قرار دارد. به منظور برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌بستر از رده‌بندی RMR

مشمپای زنجان در شکل ۵، نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود پس از اجرای هر مرحله، نیروها به تعادل رسیده است. شایان ذکر است که در مدل‌سازی‌های عددی از تأثیر آب عبوری از داخل تونل از دو منظر نشت آب و پایداری تونل‌ها صرف‌نظر شده است. از آنجا که به‌طور معمول پیش از رهاسازی آب در تونل‌های انتقال آب، جدار داخلی آن توسط لاینر نفوذناپذیر می‌شود، میزان نشت احتمالی از درون این تونل‌ها قابل اغماض و تقریباً برابر صفر است. این در حالی است که وجود آب در داخل تونل از منظر اعمال تنش‌های داخلی، که تا حدودی جایگزین بعد سوم تنش حذف شده به واسطه حفاری تونل می‌شود، شرایط پایداری تونل و تغییر شکل‌های پلاستیک اطراف توده‌سنگ را بهبود می‌بخشد. لذا عدم منظور کردن این تنش داخلی در مدل‌سازی موجب بدست آمدن نتایج محافظه‌کارانه‌تر در تحلیل پایداری تونل‌ها شده است.

جدول ۱- خصوصیات شاتکریت مورد استفاده به عنوان

سیستم نگهداری موقت			
ردیف	خصوصیات	واحد	مقدار
۱	ضخامت	cm	۱۰
۲	چگالی	kg/m ³	۲۵۰۰
۳	مدول یانگ	GPa	۲۱
۴	نسبت پواسون	-	۰/۱۵
۵	مقاومت کششی	MPa	۲
۶	مقاومت فشاری	MPa	۴

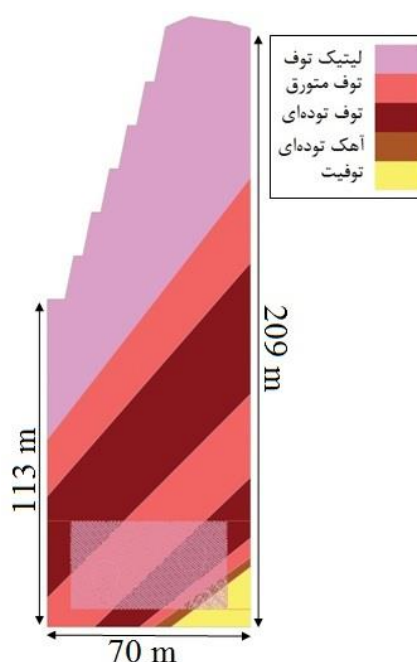


شکل ۵- مدل‌سازی عددی تغییرات نیروهای

نامتعادل‌کننده حاصل از حفاری تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان با زمان

در شکل ۶، جابجایی‌های قائم سقف دو تونل در طی

پهنای مدل ۷۰ متر و ارتفاع آن با توجه به وضعیت توپوگرافی روبرای تونل‌ها از ۱۱۳ متر تا ۲۰۵ متر متغیر است. شرایط مرزی مدل در مرزهای جانبی به صورت غلتکی و مرز پایین مدل به صورت مفصلی در نظر گرفته شد (Itasca, 2004). با توجه به ناحیه تأثیر تونل‌ها ابعاد منطقه مورد بررسی سه برابر شعاع تونل در نظر گرفته شد. به منظور تغییر بلوک‌ها از حالت صلب به تغییر شکل‌پذیر از المان‌های مثلثی با حداکثر ابعاد ۵ متر استفاده و معیار رفتاری موهر کلمب برای آن انتخاب شد. در شکل ۴، مدل هندسی وضعیت لایه‌بندی در مقطع مورد بررسی نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل‌سازی هندسی وضعیت لایه‌بندی در مقطع

قائم با استفاده از نرم‌افزار UDEC

پس از رسیدن به تعادل استاتیکی اولیه مدل، ابتدا تونلی که در تراز پایین‌تر قرار دارد (تونل A) حفر و سیستم نگهداری موقت آن نصب شده است. پس از به تعادل رسیدن نیروهای نامتعادل‌کننده حاصل از حفر تونل اول، تونل دوم (تونل B) حفر شده و سیستم نگهداری آن مانند تونل اول نصب شده است. در جدول ۱، خصوصیات شاتکریت مورد استفاده برای نگهداری تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان بیان شده است. تغییرات نیروهای نامتعادل‌کننده با زمان، در مدل‌سازی عددی مراحل حفر و نگهداری تونل‌های انحراف آب سد

رسوبی ارائه شده است. شش پارامتر مقاومت فشاری تک-محوری سنگ بکر، شاخص کیفی توده‌سنگ، فاصله‌داری درزه‌ها، شرایط درزه‌ها، شرایط آب ورودی و جهت‌یافتگی درزه‌ها جهت تعیین مقدار *RMR* توده‌سنگ مورد نیاز است (Bieniawski, 1989). در جدول ۲، پارامترهای مورد نیاز در تعیین امتیاز *RMR* تونل‌های انحراف آب سد مشمپا بیان شده است.

جدول ۲- طبقه‌بندی امتیازی *RMR* در مقطع حفاری تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان

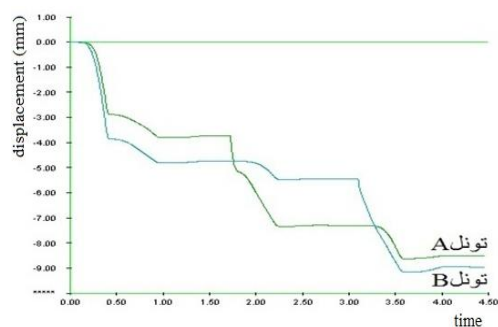
ردیف	پارامتر	امتیاز تونل A	امتیاز تونل B
۱	مقاومت فشاری تک‌محوری	۴	۹/۵
۲	شاخص کیفیت توده‌سنگ	۹	۱۳
۳	فاصله‌داری	۶/۵	۶/۵
۴	وضعیت درزه‌ها	۱۴/۵	۱۴/۵
۵	میزان آب ورودی	۷	۷
۶	جهت یافتگی درزه‌ها	۰	۰
	امتیاز <i>RMR</i>	۴۱	۵۰/۵

بارتن (۱۹۷۴) سیستم *Q* را بر پایه مطالعات انجام شده برای ۲۰۰ تونل پیشنهاد کرده است. معیار پیشنهادی بارتن برای امتیاز تجربی *Q* به صورت رابطه ۱ است.

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n} \right] \left[\frac{J_r}{J_a} \right] \left[\frac{J_w}{SRF} \right] \quad (1)$$

در این رابطه *RQD* شاخص کیفی توده‌سنگ، J_n تعداد درزه‌ها، J_r وضعیت ناهمواری‌های سطح درزه، J_a وضعیت هوازدگی درزه‌ها، J_w شرایط آب درزه‌ها و *SRF* ضریب کاهش تنش است. سیستم *Q* به صورت تابعی از سه پارامتر در نظر گرفته می‌شود که به اندازه گیری تقریبی سه کسر فوق مربوط می‌شود. کسر اول بیان کننده ابعاد بلوک، کسر دوم مقاومت برشی بین بلوک و کسر سوم تنش فعال است (Nicholas, 1974). در جدول ۳، پارامترهای مختلف مورد نیاز برای تعیین شاخص *Q* دو تونل برای مقطع مورد بررسی بیان شده است.

مراحل حفر نشان داده شده است. بیشترین جابجایی قائم در سقف و مقدار آن برای تونل A و B به ترتیب ۸/۶۴ و ۹/۱۶ میلی‌متر است. با توجه به شعاع تونل‌ها و مقدار جابجایی در سقف، بیشترین همگرایی پس از نصب سیستم نگهداری در تونل A و B به ترتیب برابر ۰/۱۷ و ۰/۱۸ درصد است.



شکل ۶- جابجایی‌های قائم سقف تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان طی مراحل حفاری

۵- مقایسه روش‌های تجربی با نتایج تحلیل عددی پایداری تونل‌های انحراف آب سد مشمپا

پس از انجام تحلیل عددی و بررسی شرایط پایداری با در نظر گرفتن پارامترهای ژئومکانیکی منطقه حفاری تونل‌های انحراف آب سد مشمپا از روش‌های تجربی *RMR* و *Q* برای تحلیل پایداری و برآورد سیستم نگهداری مورد نیاز استفاده شده است.

۵-۱- طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ تونل‌های انحراف آب

سیستم طبقه بندی توده‌سنگ با توجه به ویژگی‌هایی که بر سیستم نگهداری مورد نیاز تونل‌ها تاثیر می‌گذارند استفاده می‌شود. دو سیستم طبقه بندی رایج توده‌سنگ، *RMR* و *Q* می‌باشند که علاوه بر توصیف توده‌سنگ، با توجه به روابط و نمودارهای موجود، به انتخاب سیستم نگهداری مناسب برای تونل‌ها کمک می‌کنند (Pariseau, 2006).

سیستم طبقه‌بندی *RMR* توسط بیناوسکی (۱۹۷۳) در شورای تحقیقات علمی و صنعتی آفریقای جنوبی بر اساس تجارب کسب شده در حفر تونل‌های کم عمق در سنگ‌های

مقدار تنش‌های قائم در فضاهای زیر زمینی با استفاده از روابط تجربی قابل محاسبه است. اونال (۱۹۸۳) رابطه‌ی ۲ را برای تخمین مقدار فشار وارد بر سیستم نگهداری با استفاده از پارامترهای امتیاز RMR ارائه کرده است (Unal, 1983).

$$P_1 = \left[\frac{100 - RMR}{100} \right] \gamma B \quad (2)$$

که در آن γ وزن مخصوص سنگ (t/m^3) و B عرض تونل (m) است. بارتن (۱۹۷۴) با استفاده از امتیاز Q ، رابطه ۳ را برای محاسبه مقدار فشار نگهداری نهایی ارائه کرده است (Nicholas Barton, et al., 1974).

$$P_2 = \left[\frac{0.2}{J_r} \right] Q^{\frac{1}{3}} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

که در آن J_r ضریب زبری درزه‌ها است. در جدول ۴، مقادیر تنش‌های قائم وارد بر سقف تونل‌ها با استفاده از روش‌های تجربی و عددی بیان شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تحلیل عددی مقدار تنش‌های اعمال شده به سیستم نگهداری را به صورت محافظه کارانه ارائه کرده بنابراین هنگام طراحی استفاده از تحلیل عددی حاشیه اطمینان بیشتری لحاظ می‌کند.

جدول ۴- مقادیر فشار در سقف تونل‌ها با استفاده از روش‌های تجربی و عددی

ردیف	فشار (MPa)	تونل A	تونل B
۱	P_1	۰/۱۵	۰/۱۳
۲	P_2	۰/۶۶	۰/۴۵
۳	$P_{min} (UDEC)$	۰-۰/۵	۰-۰/۵
۴	$P_{max} (UDEC)$	۲-۰	۲-۰

۵-۳- بررسی شعاع تأثیر تونل‌های انحراف آب

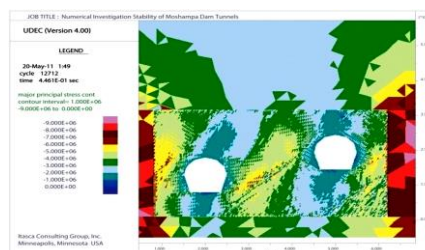
با توجه به روابط کرش، شعاع تأثیر تونل تا سه برابر شعاع آن است (Singh & Goel, 2006). در این قسمت تأثیر حفاری تونل B بر جابجایی نقاط میانی دو تونل و برآورد شعاع تأثیر تونل‌ها بررسی شده است. در شکل ۹، موقعیت نقاط اطراف تونل A که به صورت شعاعی به سمت تونل B در نظر گرفته شده، بررسی گردیده است. همان طور که از این شکل مشاهده می‌شود، این نقاط از دیواره تا فاصله ۱۲/۵ متری تونل A و به فاصله ۷/۵ تا ۲۰ متری دیواره تونل B قرار دارند. مقدار و جهت جابجایی‌های این نقاط در مراحل مختلف حفر و نصب

جدول ۳- امتیاز Q در مقطع حفاری تونل‌های انحراف آب سد مشمپا

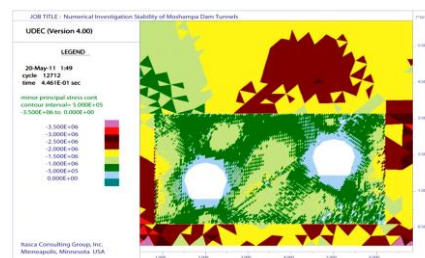
ردیف	پارامتر	امتیاز تونل A	امتیاز تونل B
۱	RQD	۴۳	۶۲
۲	J_n	۲۰	۹
۳	J_r	۲/۵	۲/۵
۴	J_a	۳	۳
۵	J_w	۱	۱
۶	SRF	۱	۱
	امتیاز Q	۱/۷۹	۵/۷۴

۵-۲- تخمین مقدار فشار قائم

به منظور مقایسه و صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی، فشار قائم وارد بر تاج تونل در تحلیل عددی تعیین و مقدار آن با مقادیر تجربی پیش‌بینی بار قائم مقایسه شده است. در شکل ۷، مقدار تنش‌های اصلی حداکثر و در شکل ۸، تنش‌های اصلی حداقل مدل پس از رسیدن به تعادل نهایی نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، مقدار تنش اصلی حداکثر در سقف دو تونل در محدوده ۰ تا ۲ مگاپاسکال و مقدار تنش‌های اصلی حداقل در سقف تونل تقریباً ۰/۵ مگاپاسکال است.



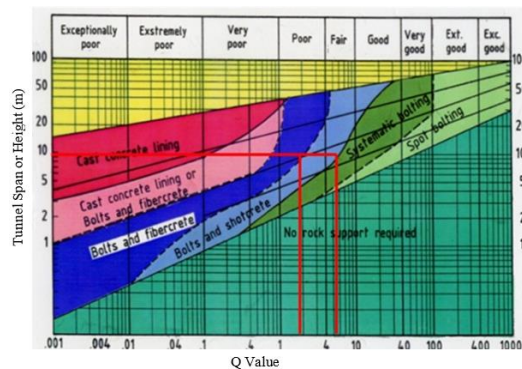
شکل ۷- مقدار تنش‌های اصلی حداکثر در مدل‌سازی عددی تونل‌های انحراف آب سد مشمپا



شکل ۸- مقدار تنش‌های اصلی حداقل در مدل‌سازی عددی تونل‌های انحراف آب سد مشمپا

(1989). بر اساس نظر هوک و همکاران (۲۰۰۰)، به عنوان انتخاب اولیه استفاده از سیم ۴ میلی‌متر در یک شبکه ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر به عنوان تقویت شاکریت پیشنهاد می‌شود (Hoek, et al., 2000).

مقدار Q دو تونل با توجه به جدول ۳، در محدوده ۱ تا ۶ قرار داشته، بنابراین توده‌سنگ در طبقه سنگ‌های ضعیف تا متوسط تقسیم‌بندی می‌شود. با توجه به شکل ۱۱ بر اساس سیستم طبقه‌بندی Q و با در نظر گرفتن دهانه ۱۰ متر سیستم نگهداری مورد نیاز برای تونل اول، پیچ سنگ و شاکریت تقویت شده است و برای تونل دوم پیچ سنگ و شاکریت به ضخامت ۵ سانتی‌متر است (Barton, 2012).



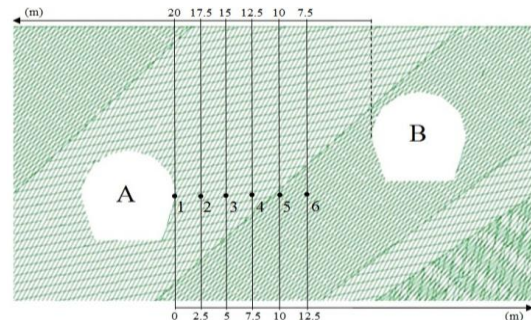
شکل ۱۱- سیستم نگهداری مورد نیاز تونل‌های انحراف آب سد مشمیا با استفاده از طبقه‌بندی Q (Barton, 2012)

۶- روش همگرایی- همجواری در تحلیل پایداری تونل‌های انحراف آب

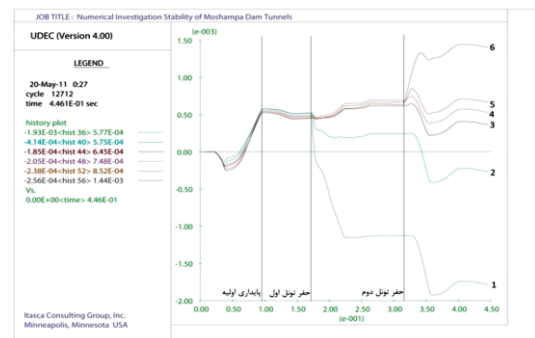
روش همگرایی- همجواری بر پایه کنترل جابجایی تونل پس از نصب سیستم نگهداری در نزدیکی جبهه کار استوار است. روش همگرایی- همجواری از سه جزء پروفیل تغییر شکل طولی، منحنی اندر کنش زمین و منحنی مشخصه نگهداری تشکیل شده است. پروفیل تغییر شکل طولی نشان‌دهنده جابجایی شعاعی مقطع عرضی تونل در راستای طولی تونل از جبهه‌کار تونل و با فرض عدم وجود نگهداری است. منحنی مشخصه سیستم نگهداری توصیف کننده فشار افزایشی اعمالی بر سیستم نگهداری با افزایش جابجایی شعاعی است (Lee, et al., 2007).

نمودار اندرکنش زمین رابطه بین افزایش فشار داخلی و افزایش جابجایی دیوار تونل را توصیف می‌کند، عموماً توسط

سیستم‌های نگهداری دو تونل ثبت و در شکل ۱۰، نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل ملاحظه می‌شود با توجه به قرارگیری نقاط ۴، ۵ و ۶ در شعاع تأثیر تونل B، این نقاط در اثر حفر به سمت منطقه حفاری شده جابجا شده‌اند. در حالی که برای نقاط خارج از شعاع تأثیر تونل B (نقاط ۱، ۲ و ۳) جابجایی‌ها تنها برای رسیدن به تعادل نهایی است.



شکل ۹- موقعیت نقاط شعاعی در بررسی تأثیر حفاری تونل انحراف B بر تونل انحراف A



شکل ۱۰- جابجایی‌های نقاط مورد بررسی در طول مراحل حفر تونل‌های انحراف آب

۵-۴- سیستم نگهداری پیشنهادی روش‌های تجربی

یکی از روش‌های متداول در طراحی سیستم‌های نگهداری فضاهای زیرزمینی، استفاده از روش تجربی است. با توجه به جدول ۲، مقدار RMR برای هر دو تونل در بازه ۴۰ تا ۶۰ قرار دارد. سیستم نگهداری پیشنهادی بیناوسکی برای این محدوده امتیازی، نصب پیچ‌سنگ به قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۴ متر در فاصله ۱/۵ تا ۲ متر در سقف و دیواره‌ها و استفاده از تورسیمی به همراه شاکریت به ضخامت ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سقف و ۳ سانتی‌متر در دیواره‌ها است (Bieniawski,)

سیستم نگهداری در نظر گرفته شده برای تونل‌ها شاکت‌ریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر است. جدول ۵، نتایج تحلیل توسط نرم‌افزار *RocSupport* را نشان می‌دهد. از آنجایی‌که ارتفاع روباره تونل *B* بیشتر از تونل *A* است، تنش وارد بر آن و در نتیجه شعاع ناحیه پلاستیک و درصد همگرایی آن بیشتر است.

جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل توسط نرم‌افزار

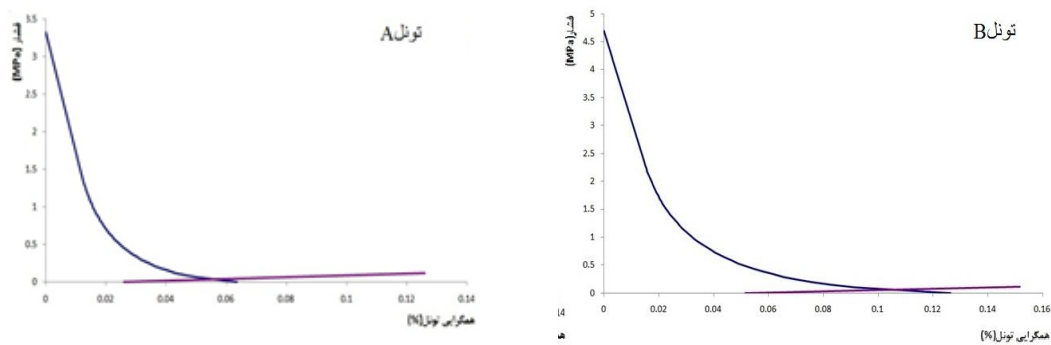
<i>RocSupport</i>				
ردیف	نتایج	واحد	تونل <i>A</i>	تونل <i>B</i>
۱	تنش برجا	MPa	۳/۳۲۸	۴/۶۹۳
۲	فشار نگهداری متحرک	MPa	۰/۰۳	۰/۰۶
۳	شعاع ناحیه پلاستیک (بدون نگهداری)	m	۱۰/۲۷	۱۲/۶
۴	شعاع ناحیه پلاستیک	m	۹/۶۱	۱۱/۴
۵	همگرایی (بدون نگهداری)	%	۰/۰۶	۰/۱۳
۶	همگرایی	%	۰/۵	۰/۱
۷	ضریب اطمینان	-	۳/۵	۲/۰۲

همانطور که ملاحظه می‌شود میزان همگرایی بدون نصب سیستم نگهداری، برای تونل‌های *A* و *B* به ترتیب برابر ۰/۰۶ درصد و ۰/۱۳ درصد است که در صورت نصب سیستم نگهداری به ۰/۰۵ درصد و ۰/۱ درصد کاهش می‌یابد. با نصب سیستم نگهداری مذکور، ضریب اطمینان ۳/۵ و ۲/۰۲ برای تونل‌های *A* و *B* بدست می‌آید. ضریب اطمینان علاوه بر تضمین ایمنی حفر تونل، نشان‌دهنده میزان اقتصادی بودن سیستم نگهداری اجرا شده است. از آنجایی‌که ضریب اطمینان در پروژه‌های عمرانی معمولاً ۲ در نظر گرفته می‌شود می‌توان سیستم نگهداری تونل *A* را مقداری کاهش داد. در شکل ۱۲، نمودار اندرکنش زمین و منحنی مشخصه سیستم نگهداری تونل‌ها نشان داده شده است. با توجه به این شکل، سیستم نگهداری در نظر گرفته شده پایداری تونل‌ها را تضمین می‌کند. شکل ۱۳، نشان‌دهنده ناحیه پلاستیک تونل‌ها است. با توجه به شعاع ناحیه پلاستیک تونل‌ها و فاصله تونل‌ها از یکدیگر، منطقه پلاستیک آن‌ها با یکدیگر تداخل ندارد و می‌توان نتیجه گرفت که تونل‌ها در فاصله ایمنی نسبت به یکدیگر قرار دارند.

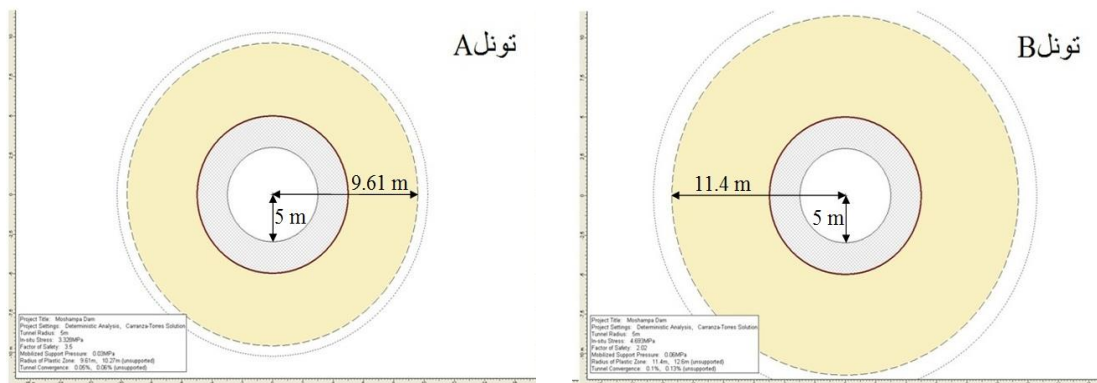
تحلیل‌های الاستوپلاستیک نیمه‌تحلیلی بر اساس فرض کرنش صفحه‌ای متقارن محوری توصیف می‌شود. روش‌های موجود اگرچه از روش‌های مختلف معیارهای شکست و رفتارهای پس از شکست مجزا می‌باشند، در حالت کلی با توجه به کرنش پلاستیک به دو دسته تقسیم می‌شوند. روش اول روشی ساده بر اساس کرنش پلاستیک است که توسط براون ارائه شده است و روش دوم که بر اساس کرنش پلاستیک افزایشی است، توسط کارانزا-تورس ارائه شده است (*Guan, et al., 2007*). از محدودیت‌های این روش، تحلیل تونل‌ها با مقطع دایروی است. از این رو برای تونل‌هایی با مقاطع دیگر از جمله نعل اسبی باید شعاعی معادل در نظر گرفت. شعاعی معادل را در نظر گرفته شده برای تونل‌های انحراف آب سد مشمپا ۵ متر است.

از طرف دیگر در روش همگرایی-همجواری برای بررسی تغییر شکل‌ها از میدان تنش‌های هیدرواستاتیک استفاده می‌شود و با کمک آن شعاع ناحیه پلاستیک تعیین می‌شود. شکست پلاستیک به معنای ریزش نیست و مصالح تسلیم‌شده اطراف تونل می‌توانند در عین تسلیم شدن مقاومت قابل توجهی داشته باشند. شعاع زون پلاستیک اطراف تونل با توجه به مقاومت توده‌سنگ نسبت به قطر تونل کوچک بوده و تنها نشانه شکست پلاستیک در زمین‌های تسلیم شده، می‌تواند ایجاد ترک‌های موضعی و انفجار سنگ باشد. باید توجه داشت که نصب سیستم نگهداری نمی‌تواند از سست‌شدگی و شکست توده‌سنگ اطراف تونل جلوگیری کند، اما سیستم نگهداری نقش عمده‌ای در کنترل تغییر شکل‌ها دارد (*Peyravi Nasab, et al., 2009*). تحلیل تونل انحراف آب سد مشمپا بر اساس روش همگرایی-همجواری با استفاده از نرم‌افزار *RocSupport* و بر اساس روش ارائه شده توسط کارانزا-تورس انجام شده است. این روش بر پایه معیار شکست هوک و براون تعمیم یافته است و به کاربر اجازه تعیین مقاومت توده‌سنگ و ویژگی‌های تغییر شکل بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص مقاومت زمین‌شناسی، ثابت سنگ‌بکر، زاویه اتساع، فاکتور اغتشاش، مدول یانگ و نسبت پواسون می‌دهد. همچنین می‌توان حل کارانزا-تورس را بر اساس مقاومت باقیمانده که معمولاً توسط پارامترهای معیار هوک و براون تعمیم یافته، تعیین می‌شود بدست آورد.

تحلیل پایداری و پیشنهاد سیستم نگهداری در تونل‌های انحراف آب سد مشمپا ... معین بهادری و ...، ص ۲۱۷-۲۳۱



شکل ۱۲- نمودار اندرکنش زمین و منحنی مشخصه سیستم نگهداری تونل‌های انحراف آب سد مشمپا



شکل ۱۳- ناحیه پلاستیک ایجاد شده اطراف تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان در اثر حفر

۷- نتیجه‌گیری

تعداد نهایی، حداکثر جابجایی‌های قائم در سقف تونل‌ها برابر ۸/۶۴ و ۹/۱۶ میلی‌متر است. با توجه به این مقادیر جابجایی، بیشترین همگرایی پس از نصب سیستم نگهداری در تونل‌ها برابر ۰/۱۷ درصد و ۰/۱۸ درصد است. پایداری تونل‌ها با استفاده از روش همگرایی- همجواری نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این روش نشان می‌دهد پس از نصب سیستم نگهداری تأیید شده از سایر روش‌ها، ضریب اطمینان ۳/۵ و ۲/۰۲ برای تونل‌ها بدست می‌آید. همچنین همگرایی نهایی تونل‌ها با استفاده از روش همگرایی- همجواری برابر ۰/۰۵ درصد و ۰/۱ درصد می‌شود. بنابراین هر سه روش عددی، تجربی و همگرایی- همجواری استفاده از شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر را به عنوان سیستم نگهداری موقت تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان تأیید می‌کنند.

در این مقاله وضعیت پایداری تونل‌های انحراف آب سد مشمپای زنجان توسط نرم‌افزار المان مجزای *UDEC* تحلیل شد. با توجه به محدوده امتیازی توده‌سنگ برای سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی *Q* و *RMR*، شاتکریت به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر به عنوان سیستم نگهداری موقت پیشنهاد می‌شود. مقدار تنش‌های قائم وارد بر سیستم نگهداری با استفاده از روش‌های تجربی محاسبه و با نتایج تحلیل عددی مقایسه شده است. از آنجا که مقدار حداکثر این تنش‌ها از مقاومت شاتکریت مورد استفاده کمتر است، پایداری تونل‌ها تضمین می‌شود. نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد در صورت استفاده از شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و رسیدن به

۸- مراجع

- Bahrani, N., & Hadjigeorgiou, J. (2018). *Influence of Stope Excavation on Drift Convergence and Support Behavior: Insights from 3D Continuum and Discontinuum Models*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(8), 2395-2413. doi:10.1007/s00603-018-1482-5
- Barton, N. (2012). *Reducing risk in long deep tunnels by using TBM and drill-and-blast methods in the same project—the hybrid solution*. *Journal of Rock Mechanics Geotechnical Engineering*, 4(2), 115-126.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6(4), 189-236.
- Bhasin, R., & Høeg, K. (1998). *Parametric study for a large cavern in jointed rock using a distinct element model (UDEC—BB)*. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 35(1), 17-29.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*: John Wiley & Sons.
- Cacciari, P. P., & Futai, M. M. (2021). *The Influence of Fresh and Weathered Rock Foliation on the Stability of the Monte Seco Tunnel*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(2), 537-558. doi:10.1007/s00603-020-02292-z
- Cai, M. (2008). *Influence of stress path on tunnel excavation response—Numerical tool selection and modeling strategy*. *Tunnelling Underground Space Technology*, 23(6), 618-628.
- Chen, M., Yang, S. Q., Zhang, Y. C., & Zang, C. W. (2016). *Analysis of the failure mechanism and support technology for the Dongtan deep coal roadway*. *Geomechanics engineering*, 11(3), 401-420.
- Cundall, P. A., & Hart, R. D. (1992). *Numerical modelling of discontinua*. *Engineering computations*.
- Dasgupta, B., Sharma, M., Verma, M., & Sharma, V. (1999). *Design of underground caverns for Tehri Hydropower Project, India by numerical modelling*. Paper presented at the 9th ISRM Congress.
- Evgin, E., & Fu, Z. (2009). *Distinct element and finite element analyses of underground excavations in jointed rock mass*. Paper presented at the Canadian Geotechnical Conference.
- Fan, S. C., Jiao, Y. Y., & Zhao, J. (2004). *On modelling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method*. *Computers Geotechnics*, 31(1), 57-66.
- Farhadian, H., Nikvar Hassani, A., & Katibeh, H. (2017). *Groundwater inflow assessment to Karaj Water Conveyance tunnel, northern Iran*. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2429-2438. doi:10.1007/s12205-016-0995-2
- Gao, F., Stead, D., & Kang, H. (2014). *Simulation of roof shear failure in coal mine roadways using an innovative UDEC Trigon approach*. *Computers and Geotechnics*, 61, 33-41. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.04.009>
- Gattinoni, P., & Scesi, L. (2010). *An empirical equation for tunnel inflow assessment: application to sedimentary rock masses*. *Hydrogeology Journal*, 18(8), 1797-1810. doi:10.1007/s10040-010-0674-1
- Goodman, R. E., Moye, D. G., Van Schalkwyk, A., & Javandel, I. (1964). *Ground water inflows during*

tunnel driving: College of Engineering, University of California.

- Grimstad, E. (1993). *Updating the Q-system for NMT. Paper presented at the Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagemes, Oslo, Norwegian Concrete Association, 1993.*
- Guan, Z., Jiang, Y., & Tanabasi, Y. (2007). *Ground reaction analyses in conventional tunnelling excavation. Tunnelling Underground Space Technology, 22(2), 230-237.*
- Hao, Y., & Azzam, R. (2005). *The plastic zones and displacements around underground openings in rock masses containing a fault. Tunnelling Underground Space Technology, 20(1), 49-61.*
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (2000). *Support of underground excavations in hard rock: CRC Press.*
- Itasca, C. G. (2004). *UDEC: Itasca.*
- Jiao, Y., Fan, S., & Zhao, J. (2005). *Numerical investigation of joint effect on shock wave propagation in jointed rock masses. Journal of Testing Evaluation, 33(3), 1-7.*
- Johansson, E., & Kuula, H. (1995). *Three-dimensional back-analysis calculations of Viikinmaki underground sewage treatment plant in Helsinki. Paper presented at the 8th ISRM Congress.*
- Karampinos, E., Hadjigeorgiou, J., Hazzard, J., & Turcotte, P. (2015). *Discrete element modelling of the buckling phenomenon in deep hard rock mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 80, 346-356. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.10.007>*
- Lee, S. W., Jung, J. W., Nam, S. W., & Lee, I.-M. (2007). *The influence of seepage forces on ground reaction curve of circular opening. Tunnelling Underground Space Technology, 22(1), 28-38.*
- Li, S., Wang, Z., Ping, Y., Zhou, Y., & Zhang, L. (2014). *Discrete element analysis of hydro-mechanical behavior of a pilot underground crude oil storage facility in granite in China. Tunnelling and Underground Space Technology, 40, 75-84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.09.010>*
- Mobini, A., Mir Rahimi, M. R., Kooshki, M. R., & Sajoodi, K. (2006). *Engineering Geology Report of Meshmpa Project. Retrieved from*
- Pariseau, W. G. (2017). *Design Analysis in Rock Mechanics 3rd Edition (3rd Edition ed.).*
- Peyravi Nasab, P., Bakhshandeh Ammieh, H., & Siamaki, A. (2009). *Technical and Economic Study of Selecting the Optimal Supporting Method for Injection Gallery of Level 107 on the Left Side of Gotvand Olya Dam and Hydropower Plant. Paper presented at the Third Iranian Mining Engineering Conference.*
- Rahmani, N., Nikbakhtan, B., Ahangari, K., & Apel, D. (2012). *Comparison of empirical and numerical methods in tunnel stability analysis. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 26(3), 261-270. doi:10.1080/17480930.2011.611615*
- Singh, T. D., & Singh, B. (2006). *Elsevier Geo-Engineering Book 5: Tunnelling In Weak Rocks (Vol. 5): Elsevier.*
- Sitharam, T., & Latha, G. M. (2002). *Simulation of excavations in jointed rock masses using a practical*

- equivalent continuum approach. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 39(4), 517-525.
- Son, M., & Cording Edward, J. (2011). Responses of Buildings with Different Structural Types to Excavation-Induced Ground Settlements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(4), 323-333. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000448
- Sun, X., Zhao, C., Tao, Z., Kang, H., & He, M. (2021). Failure mechanism and control technology of large deformation for Muzhailing Tunnel in stratified rock masses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(6), 4731-4750. doi:10.1007/s10064-021-02222-5
- Unal, E. (1983). *Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs (Vol. 13): Pennsylvania State University*.
- Varma, M., Maji, V. B., & Boominathan, A. (2019). Numerical modeling of a tunnel in jointed rocks subjected to seismic loading. *Underground Space*, 4(2), 133-146. doi:<https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.11.001>
- Xia, Y., Peng, S., Gu, Z., & Ma, J. (2007). Stability analysis of an underground power cavern in a bedded rock formation. *Tunnelling Underground Space Technology*, 22(2), 161-165.
- Yoshida, H., Horii, H., & Uno, H. (1995). Micromechanics-based continuum theory for jointed rock mass and analysis of large-scale cavern excavation. Paper presented at the 8th ISRM Congress.