

ارزیابی تغییرشکل و گسترش ناحیه پلاستیک در توده‌سنگ تونل گلاب ۲ اصفهان با روش‌های تحلیل همگرایی همجواری و عددی

شهرزاد نیکوبخت^۱، حمید مهرنهاد^۲، محمد آذرافزا^۳ و ابراهیم اصغری کلجاهی^{۴*}

۱ و ۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یزد، یزد

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۴- گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تبریز، تبریز

نویسنده مسئول: *e-asghari@tabrizu.ac.ir

دریافت: ۹۸/۵/۱۱ پذیرش: ۹۸/۸/۸

چکیده

در این مطالعه، از رویکرد تحلیلی دونکان- فاما (DFM) و روش‌های عددی تفاضل محدود (FDM) مبتنی بر رویکرد تحلیل همگرایی همجواری (CCM) برای تعیین تغییر شکل، میدان تنش و گسترش ناحیه پلاستیک توده میزبان تونل گلاب ۲ استفاده شده است. برای تحلیل و شبیه‌سازی از نرم‌افزارهای $RocSupport$ و $FLAC^{2D}$ استفاده شده است. رویکرد CCM از منحنی‌های پاسخ زمین (GRC)، پروفیل تغییر شکل طولی (LDP) و شاخصه حائل (SCC) برای ارزیابی تغییرشکل‌ها و جابجایی‌های دیواره تونل استفاده می‌کند. شبیه‌سازی ارائه شده برای بحرانی‌ترین پهنه‌های تونل (پهنه ۲ و ۱۰ از میان ۱۵ پهنه) که عموماً از واحدهای زمین‌شناسی شیلی با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون تشکیل شده‌اند، صورت گرفته است. پهنه‌های مورد بررسی دارای خصوصیات متغیر و تکتونیزه می‌باشند. این مساله بر رفتار مکانیکی مصالح تاثیر داشته و لهیدگی قابل‌توجهی را بر سیستم نگهداری وارد می‌آورد. نتایج آزمایشات ژئوتکنیکی پایین بودن پارامترهای مقاومتی و مکانیکی توده‌سنگ‌های این پهنه‌ها، به خصوص پهنه ۱۰ را نشان می‌دهد. بر پایه نتایج مدل‌های تحلیلی و عددی که برای ۴ بازه مقاومتی مصالح طراحی و منحنی‌های CCM ($GRC-SCC$) برای این بازه‌ها ترسیم گردیده، مشخص شده که این پهنه‌ها به ترتیب تحت فشار داخلی ۷/۵۶ و ۴/۱۸ مگاپاسکال بوده و ناحیه پلاستیک ۲/۸۵ و ۲/۸۸ متری را ایجاد نمایند. با پیاده‌سازی سازه مهاری با قبول ۱۰ میلی‌متر جابجایی تعیین شده، ناحیه پلاستیک به ۲/۴۳ و ۲/۳۰ متر کاهش می‌یابد. در این شبیه‌سازی رویکرد عددی نسبت به روش تحلیلی دارای افت بوده و مهار را با صلبیت بیش‌تری دنبال می‌کند. از سوی دیگر با مطالعه نمودارهای رفتاری مبتنی بر LDP ، جابجایی تقریباً یکسانی را برای بازه‌های کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت برآورد نموده‌اند. با ارزیابی میدان تنش برجا پهنه‌های ۲ و ۱۰ مشخص شد که تغییرات میدان تنش در پهنه ۱۰ بصورت ناگهانی بوده اما در پهنه ۲ تغییرات پیوسته است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل همگرایی همجواری (CCM)، منحنی پاسخ زمین (GRC)، منحنی شاخصه حائل (SCC)، پروفیل تغییرشکل طولی (LDP)، تونل گلاب ۲

۱- پیشگفتار

فضای اطراف تونل‌ها بکار گرفته می‌شود که یکی از مهم‌ترین این رویکردها، بکارگیری منحنی‌های تحلیل رفتاری است. این رویکرد به عنوان یکی از رویکردهای موفق در ارزیابی تغییرشکل توده‌سنگ‌های میزبان فضاهای زیرزمینی، گسترش ناحیه پلاستیک، میدان تنش برجا، پیش‌بینی مناسبی از شرایط کرنش پیوسته، خزش و لهیدگی بشمار می‌آید (الژانو و همکاران، ۲۰۰۹؛ کای و همکاران، ۲۰۱۵). این مطالعات که معمولاً بر روی تحلیل رفتار مکانیکی توده‌سنگ و اندرکنش زمین- سازه نگهدارنده می‌پردازد به رویکردهای تحلیل همگرایی

پیش‌بینی محدوده تغییرشکل پلاستیک در اطراف تونل‌ها تاثیر مستقیمی بر روی طراحی موفقیت‌آمیز سیستم نگهدارنده و در نهایت پایداری تونل دارد. در این راستا رفتار مبتنی بر زمان در توده‌های سنگی میزبان که سبب رخداد این تغییرشکل‌ها گردیده و با گسترش ناحیه پلاستیک، فشار به سیستم نگهدارنده، لهیدگی^۱ و شکست تونل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (پاراسکوپولوس و دیه درپس، ۲۰۱۸). روش‌های مختلفی برای این ارزیابی‌ها

¹ Squeezing

اولویت می‌باشد)، فراهم می‌آورد. با این حال بکارگیری این روش دارای محدودیت‌های خاص می‌باشد (اورست، ۲۰۰۹). امکان بکارگیری روش *CCM* علاوه بر مقطع شعاعی به صورت طولی توسط پارامتر *LDP*، امکان ارزیابی تغییرشکل‌ها را در محور طولی را نیز فراهم می‌سازد. این مزیت عموماً در تحلیل لهیدگی محوری تونل کاربرد مناسبی دارد. شکل ۱ مبانی مدل رفتاری ترسیم شده توسط روش *CCM* را نشان می‌دهد (ژاندا و همکاران، ۲۰۱۳). از این روش می‌توان در طراحی سیستم نگهدارنده بهینه تونل از دیدگاه فشار- تغییرشکل استفاده نمود. همچنین تحلیل شرایط گسترش نواحی پلاستیک و روند پاسخ مورد نیاز برای مهار تغییرشکل-های ناشی از میدان تنش حول فضای تونل را تعیین کرد. مهمترین جنبه بکارگیری رویکرد *CCM* استفاده از منحنی‌های *GRC*، *LDP* و *SCC* برای ارزیابی رفتارهای تغییرشکلی در حول تونل می‌باشد. منحنی‌های *GRC-SCC* نشان‌دهنده راه‌حل‌های تحلیلی برای تغییر رفتار مکانیکی در دیواره تونل تحت شرایط فشار نگهدارنده می‌باشند که بصورت مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند (تاثیر متقابل بر هم ندارند)؛ اما تاثیر این دو عامل در طراحی سیستم نگهداری مبتنی بر شرایط حفاری یک واقعیت است، بطوری که *GRC* عامل ارزیابی نیروی کرنشی و لهیده کننده و *SCC* عامل ایجاد نیروی مقاوم در راستای این کرنش توسط سیستم نگهداری بشمار می‌آید (اوکی و همکاران، ۲۰۱۸). امروزه محققین مختلفی رویکردهای گوناگونی را برای تحلیل مبتنی بر روش‌های *CCM* و منحنی‌های *GRC*، *LDP* و *SCC* ارائه داده‌اند که از این میان، روش‌های تحلیلی^۶، نیمه‌عددی-تحلیلی محدود^۷ و عددی^۸ بیش‌ترین موفقیت را کسب نموده‌اند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ کونزالس-کائو و همکاران، ۲۰۱۳؛ وارکاس و انانگوستائو، ۲۰۱۴؛ وارکاس، ۲۰۱۷؛ اوکی و همکاران، ۲۰۱۸). در این مطالعه با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی اقدام به پیاده سازی و برآورد منحنی‌های *CCM* گردیده است. در این راستا رویکرد تحلیلی دونکان- فاما^۹ (*DFM*) و روش عددی تفاضل محدود (*FDM*) مبتنی بر رویکرد تحلیل

همجواری^۲ (*CCM*) معروفند. این رویکردها با مدنظر قرار دادن اندرکنش زمین-سازه نگهدارنده و فرض کاهش شعاعی بار تغییرشکل دهنده، تغییر میدان تنش و گسترش ناحیه پلاستیک را در توده‌سنگ میزبان تونل برآورد نموده و گسیختگی‌های ساختاری یا تغییر شکل‌های پلاستیک را برآورد می‌نماید (برآوردن و همکاران، ۱۹۸۳). روش تحلیل *CCM* معمولاً از سه بخش اصلی شامل منحنی پاسخ زمین^۳ (*GRC*)، پروفیل تغییرشکل طولی^۴ (*LDP*) و منحنی شاخصه حائل^۵ (*SCC*) تشکیل شده است (اورست، ۲۰۰۹). در منحنی *GRC* تغییرشکل‌های حاصل از بازآرایی تنش‌ها و تمرکز تنش در دیواره تونل به صورت منحنی جابجایی، نمود پیدا کرده و منحنی *SCC* که شاخصی بر میزان صلبیت سیستم نگهداری است و عاملی بر کنترل این تغییرشکل به شمار می‌آید؛ در مقابل یکدیگر ترسیم می‌گردد. محل تلاقی این دو منحنی موقعیت بهینه فشار و تغییر شکل‌های تونل و سازه نگهدارنده را مشخص می‌کند. از مزایای بکارگیری *CCM*، امکان تعیین صلبیت سازه نگهدارنده، برآورد نقطه تعادل بهینه در اندرکنش توده-سازه، امکان برآورد فاصله از جبهه حفاری و میزان فشار داخلی به صورت یک مدل دو بعدی ساده می‌باشد (کارانزا-تورس و فایره‌ارست، ۲۰۰۰؛ کوی و همکاران، ۲۰۱۵). در تحلیل‌های مبتنی بر *CCM*، منحنی *GRC* مهم‌ترین نقش در شناسایی و توصیف میزان تشکیل و گسترش ناحیه تغییرشکل پلاستیک در محدوده تونل دارد که برای تعیین حرکت سنگ و یا تغییرشکل توده‌سنگ در اثر حفاری اطلاق می‌گردد (فانگ و همکاران، ۲۰۱۳). به طوری که محیط با ایجاد تغییرشکل همگرا به سمت تونل در صدد ایجاد تعادل مجدد شرایط تنش برآمده و در نتیجه با تمرکز تنش در دیواره‌ها و تخریب تونل همراه است. استفاده از رویکرد تحلیلی *CCM* به دلیل لحاظ نمودن رفتار توده‌سنگ و اندرکنش سازه نگهدارنده در طراحی‌های مهندسی بسیار مهم است، به طوری که روش تحلیل *CCM* علاوه بر نوع سازه نگهدارنده، زمان بهینه و مناسب را برای اجرای سازه سبک‌تر (که به لحاظ اقتصادی و مهندسی دارای یک

⁶ Analytical solutions

⁷ Finite semi-analytical methods

⁸ Numerical approaches

⁹ Duncan-Fama analytical method

² Convergence Confinement Method

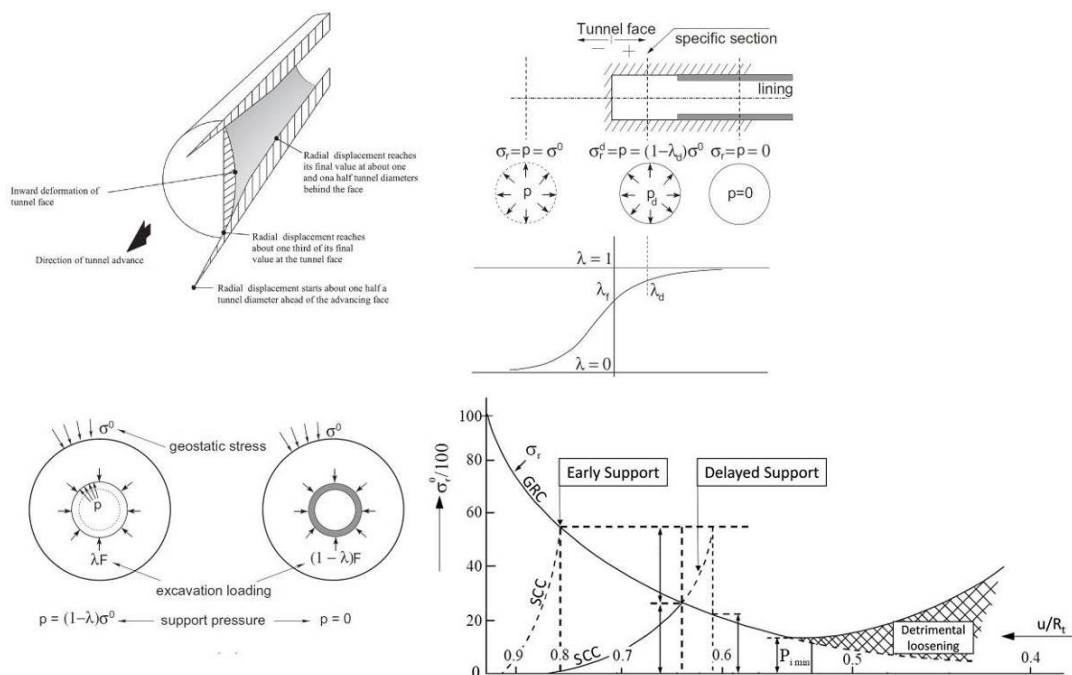
³ Ground Response Curve

⁴ Longitudinal Deformation Profile

⁵ Support Characteristic Curves

تحلیل و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزارهای *RocSupport* و *FLAC^{2D}* می‌باشد.

همگرایی همجواری (*CCM*) برای تعیین نحوه تغییر شکل، میدان تنش و گسترش ناحیه پلاستیک توده میزبان تونل گلاب ۲ اصفهان استفاده شده که روند

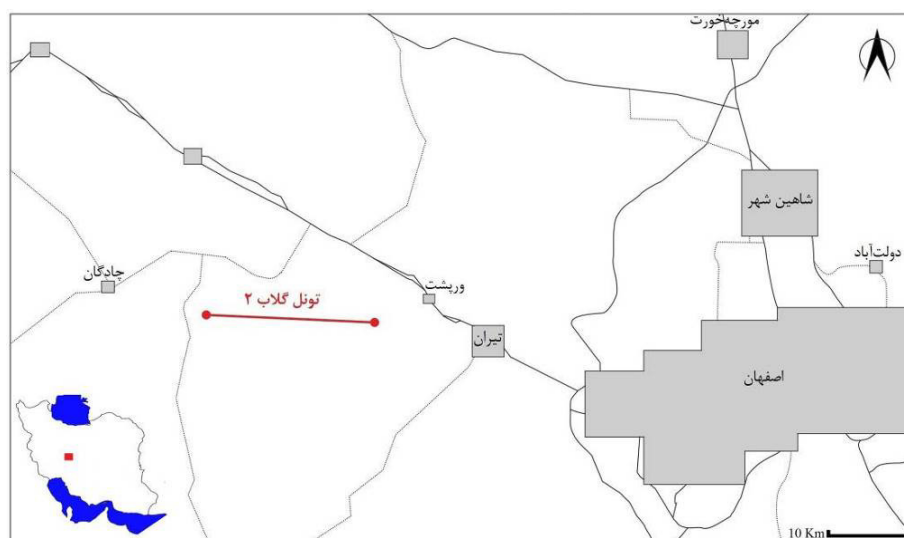


شکل ۱. مبانی تحلیل به روش *CCM* (زانادا و همکاران، ۲۰۱۳)

مشکل از سازندهای شیلی آهکی با میان‌لایه‌های ماسه سنگی و سیلتستونی می‌باشند که البته در بخش ورودی تونل کنگلومرای اتوسن دیده می‌شود. وضعیت عمومی سازندهای شیلی-سیلتستونی مسیر تونل به دلیل جنس سنگ‌ها و مقاومت کم آن‌ها در رده سنگ‌های دارای رفتار ضعیف و نگران‌کننده در طبقه‌بندی سینگ و گوئل (۲۰۱۰) طبقه‌بندی شده است. در این سنگ‌ها نسبت رس به دیگر کانی‌ها متغیر بوده و معمولاً درزه‌ها یا لایه‌بندی موازی با ضخامت حتی کمتر از یک سانتی‌متر شناخته می‌شود (آقابیاتی، ۱۳۸۵). این ماهیت لیتولوژیکی سبب می‌گردد که تغییرات رفتار مکانیکی سنگ‌های شیلی گسترده بوده و ایستایی در حفاری‌ها پایین باشد. بنابراین دقت در ارزیابی‌های زمین‌شناسی مهندسی سازندهای شیلی دارای عدم قطعیت‌های فراوانی بوده و تغییرات مقاومتی در آن‌ها گسترده است (فلچر، ۲۰۱۶). این مساله سبب گردیده تا در ارزیابی و پهنه‌بندی مسیر تونل گلاب ۲، تغییرات ساختاری و هم‌چنین تغییر در شرایط زمین‌شناسی مهندسی مسیر به عنوان مبانی طبقه‌بندی مد نظر قرار گیرد (نیکوبخت، ۱۳۹۲).

۲- منطقه مورد بررسی و مشخصات تونل گلاب ۲

تونل گلاب ۲ یکی از تونل‌های انتقال آب شرب به اصفهان است که در ۷۵ کیلومتری غرب شهر اصفهان و در غرب دشت کرون با ماشین حفار (*TBM*) ساخته شده است. این تونل با مقطع دایره‌ای به قطر نهایی ۴/۶ متر و به طول ۱۷ کیلومتر از محل تلمبه خانه زیرزمینی تونل گلاب شروع شده و با گذر از سازندهای مختلف زمین‌شناسی به محدوده جنوب‌غربی روستای ورپشت خاتمه می‌یابد. شکل ۲ موقعیت تونل مذکور نشان داده شده است. طول تونل سبب گردیده تا این تونل از پهنه‌های مختلف زمین‌شناسی (۱۵ پهنه) عبور کند. به منظور ارزیابی ژئومکانیکی، هر پهنه بطور جداگانه‌ای مورد توجه قرار گرفته است (نیکوبخت، ۱۳۹۲). بر پایه مطالعات زمین‌شناسی صورت گرفته در مسیر تونل گلاب ۲، این تونل در ۱۵ پهنه زمین‌شناسی مختلف طبقه‌بندی گردیده است که در جدول ۱ ارائه شده است. شاخص‌های اصلی در تقسیم‌بندی این پهنه‌ها، عموماً عوامل ساختاری و زمین‌شناسی مهندسی مسیر بوده است. به لحاظ لیتولوژی و سنگ‌شناسی توده‌های میزبان تونل عموماً



شکل ۲. موقعیت تونل گلاب ۲ در استان اصفهان

جدول ۱. پهنه‌بندی مسیر تونل و خصوصیات زمین‌شناسی هر پهنه (نیکوبخت، ۱۳۹۲)

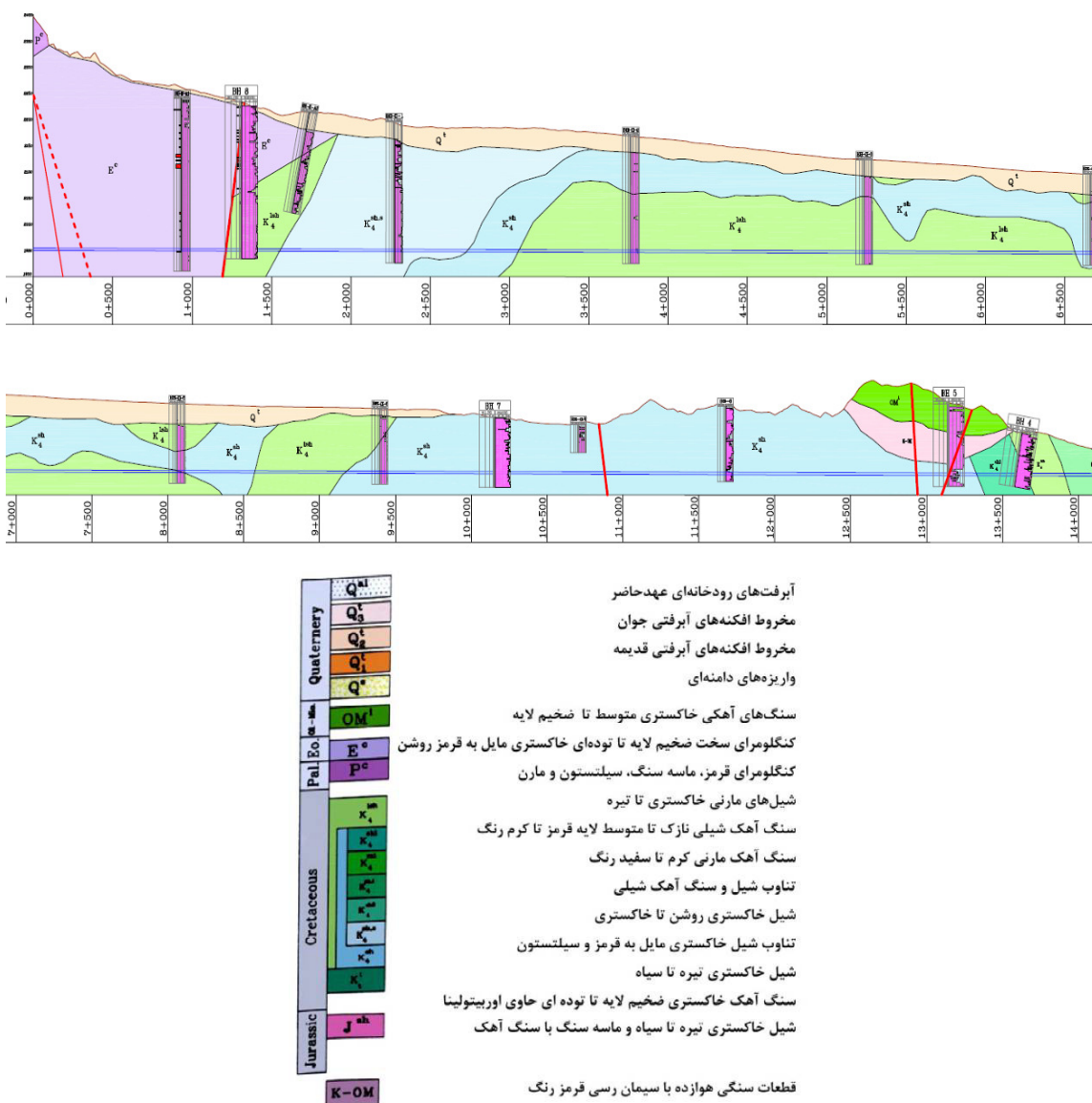
شماره پهنه	مترائز شروع	مترائز پایان	توصیف زمین‌شناسی
۱	۰	۱۲۱۰	کنگومرای قرمز متمایل به خاکستری آئوسن
۲	۱۲۱۰	۱۵۵۰	شیل آهکی خاکستری تا خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون
۳	۱۵۵۰	۲۷۳۰	شیل و شیل آهکی
۴	۲۷۳۰	۳۰۵۰	شیل آهکی خاکستری تا خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون
۵	۳۰۵۰	۶۵۷۰	شیل آهکی خاکستری تا خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون
۶	۶۵۷۰	۶۸۰۰	شیل خاکستری تیره با لایه‌های نازک کلسیت
۷	۶۸۰۰	۸۱۰۰	شیل آهکی خاکستری تا خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون
۸	۸۱۰۰	۸۵۷۰	شیل آهکی خاکستری تا خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون
۹	۸۵۷۰	۹۱۶۰	شیل آهکی خاکستری تا خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون
۱۰	۹۱۶۰	۱۳۳۳۰	شیل آهکی خاکستری تا خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون
۱۱	۱۳۳۳۰	۱۳۴۵۰	شیل آهکی قرمز مایل به خاکستری
۱۲	۱۳۴۵۰	۱۳۹۲۵	شیل آهکی قرمز مایل به خاکستری
۱۳	۱۳۹۲۵	۱۶۰۱۰	شیل خاکستری تیره تا سیاه با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و سیلتستون
۱۴	۱۶۰۱۰	۱۶۶۲۰	شیل و سیلتستون قرمز مایل به خاکستری (آلتره شده)
۱۵	۱۶۶۲۰	۱۷۰۲۳	شیل آهکی قرمز مایل به خاکستری

مهندسين مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۸-الف). همان طور که در این جدول دیده می‌شود، تغییرات مربوط به خصوصیات مهندسی و مکانیکی مصالح، متفاوت است. این مسئله از روی افت قابل‌توجه در مقاومت سنگ برای هر پهنه قابل مشاهده است. با توجه به گستردگی تغییرات محیط زمین‌شناسی مسیر تونل، گمانه‌هایی بصورت قائم و زاویه دار در بخش‌های بحرانی هر پهنه حفر گردیده که بتواند ویژگی‌های کیفیت توده‌سنگ و شرایط ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها را بررسی کرد. موقعیت این گمانه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. با استفاده از

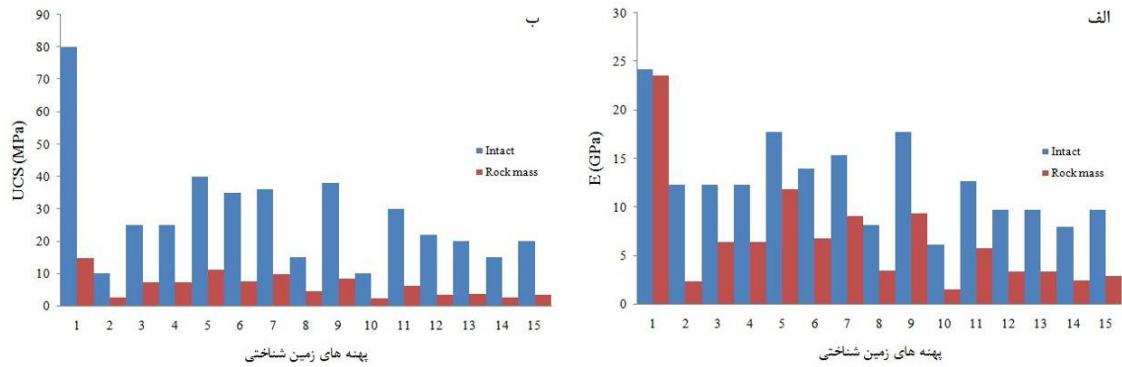
شکل ۳ مقطع زمین‌شناسی تهیه شده از مسیر تونل گلاب ۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تغییرات ساختاری ناشی از تکتونیک زاگرس بر روی ساختار توده میزبان تونل تاثیر قابل‌توجهی داشته است. بدین منظور از واحدهای سنگی مختلف نمونه‌برداری شده و هم‌چنین آزمایشات برجا (بارگذاری صفحه، چکش‌اشمیت، برش درزه برجا) و آزمایشگاهی (مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوری و برش مستقیم) انجام گردیده که در جدول ۲ نتایج بدست آمده نشان داده شده است (شرکت

مهندسی در این دو پهنه بحرانی تونل به شرایط محیطی مانند وجود سنگ‌های سست، خرد شده و هوازده نسبت داده شده است. این مسئله در ارزیابی‌های سنگ بکر و توده‌سنگ نیز مشاهده شده است. همچنین از نظر وجود درز و شکاف و گسل‌های کوچک زیاد، به عنوان پهنه‌های بحرانی تونل تعیین شده‌اند (شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۸-ب). بنابراین این دو پهنه به عنوان بحرانی‌ترین حالات برای توسعه ناحیه پلاستیک، ایجاد فشار روباره و افزایش پتانسیل لهیدگی مورد توجه قرار گرفته که به نام پهنه‌های A و B نام‌گذاری می‌شوند.

اطلاعات حاصل از ارزیابی‌های زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته به کمک مغزه‌های حفاری، تفکیک پهنه‌های مختلف صورت گرفته است. به هر حال، بر پایه نتایج آزمایشات ژئومکانیکی و مطالعات زمین‌شناسی مهندسی برای مسیر تونل گلاب ۲ مشخص گردیده که پهنه‌های ۲ و ۱۰ دارای بیش‌ترین تغییرات و کمترین مقادیر مقاومتی بوده و به لحاظ ساختاری سنگ‌های این پهنه خردشدگی و هوازدگی قابل‌توجهی را دارند (شکل ۴). این گستردگی تغییرات مقاومتی و خصوصیات ژئومکانیکی بر روی ایستایی تونل و پتانسیل لهیدگی موثر است. تغییرات مقاومت و پارامترهای زمین‌شناسی



شکل ۳. مقطع زمین‌شناسی مهندسی با امتداد شرقی - غربی و موقعیت گمانه‌های مسیر تونل گلاب ۲ (نیکوبخت و همکاران، ۱۳۹۳)



شکل ۴. تغییرات پارامترهای مقاومتی و ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ تونل گلاب ۲: (الف) UCS، (ب) E

جدول ۲. نتایج مطالعات ژئوتکنیکی و خصوصیات ژئومکانیکی توده میزبان تونل (شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب، ۱۳۸۸-ب)

پارامترهای توده‌سنگ				پارامترهای سنگ بکر			شماره پهنه	
v_m	E_m (GPa)	UCS_m , MPa	ϕ (degree)	c (kPa)	v	E (GPa)		UCS (MPa)
۰/۲۰	۲۳-۲۴/۱۲	۱۴/۱۹-۱۵/۲۵	۴۲	۲۳۴۰-۲۴۷۰	۰/۱۶	۲۴/۱۵	۸۰	۱
۰/۴۰	۱/۸۴-۲/۸	۱/۴۶-۳/۴۷	۲۶-۳۹	۵۱۲-۶۴۲	۰/۳۵	۱۲/۲۶	۱۰	۲
۰/۳۷	۲/۸۱-۹/۸۷	۴/۱۶-۱۰/۰۷	۳۲-۴۲	۶۹۶-۱۴۱۹	۰/۳۵	۱۲/۲۶	۱۵-۳۵	۳
۰/۳۷	۲/۸۱-۹/۸۷	۴/۱۶-۱۰/۰۷	۳۱-۴۲	۴۷۱-۱۴۸۷	۰/۳۵	۱۲/۲۶	۱۵-۳۵	۴
۰/۳۴	۱۰/۹۴-۱۲/۷۸	۱۰-۱۲/۲۹	۱۳-۴۴	۸۴۵-۱۴۲۱	۰/۳۰	۱۷/۷۱	۴۰	۵
۰/۳۰	۶/۶۱-۶/۹۴	۷/۲۴-۷/۶۷	۴۲-۴۳	۸۵۵-۹۱۰	۰/۲۶	۱۳/۹	۳۵	۶
۰/۳۰	۸/۳۳-۹/۷۸	۸/۶۳-۱۰/۶	۳۴-۳۵	۱۰۵۶-۱۳۳۳	۰/۲۶	۱۵/۲۸	۳۶	۷
۰/۳۸	۳/۰۴-۳/۸۸	۴/۳۴-۴/۷	۳۷-۳۸	۵۲۶-۵۵۶	۰/۳۰	۸/۱	۱۵	۸
۰/۳۳	۸/۸-۹/۹۱	۷/۲۳-۹/۲	۳۵-۳۶	۸۷۷-۱۰۵۶	۰/۲۹	۱۷/۷۱	۳۸	۹
۰/۳۹	۱/۳۷-۱/۵۵	۱/۸۸-۲/۴۹	۲۷-۲۸	۳۸۷-۴۲۷	۰/۳۵	۶/۱۲	۱۰	۱۰
۰/۳۴	۵/۴-۶/۱	۵/۴۴-۶/۸۶	۳۵-۳۶	۵۵۰-۶۶۴	۰/۳۲	۱۲/۶۴	۳۰	۱۱
۰/۳۹	۳/۱۴-۳/۵۲	۲/۹۷-۳/۹۵	۳۱-۳۲	۳۶۶-۴۲۱	۰/۳۶	۹/۶۷	۲۲	۱۲
۰/۳۸	۳/۲۱-۳/۵۲	۳/۱۵-۳/۹۵	۳۳-۳۴	۳۳۳-۳۷۷	۰/۳۵	۹/۶۷	۲۰	۱۳
۰/۳۴	۲/۲۵-۲/۵۲	۲/۱۷-۲/۹۳	۲۸-۳۰	۱۴۷-۱۸۱	۰/۳۷	۷/۹	۱۵	۱۴
۰/۳۸	۲/۵۲-۳/۱۴	۲/۹۷-۳/۹۵	۳۳-۳۶	۲۵۲-۳۰۵	۰/۳۵	۹/۶۷	۲۰	۱۵

ماهیت ناپایداری از ساختاری (ریزش بلوکی) به تغییرشکل پلاستیک و لهیدگی تونل می‌باشد که معلول میدان تنش و توزیع کرنش پلاستیک پیوسته حول تونل است. در میان این دو پهنه شرایط پهنه B نسبت به پهنه A نیز بدتر بوده و انتظار می‌رود تغییرات این پهنه گسترده‌تر از دیگری باشد. بنابراین بیش‌ترین چالش برای ایستایی تونل در این پهنه‌ها خواهد بود، بطوری که کنترل و مهار فشار لهیدگی مبتنی بر کرنش پیوسته و تغییرشکل پلاستیک برای این پهنه‌ها (که بیش‌ترین فشار نسبت به کل تونل خواهد بود)، می‌تواند در طراحی بهینه و پیشنهاد سیستم نگهداری مناسب برای تونل موثر باشد.

با در نظر گرفتن ارزیابی‌های صورت گرفته و نتایج ارائه شده در جدول ۲ و شکل ۴، پهنه‌های A و B دارای کمترین مقادیر پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ نسبت به سایر پهنه‌ها می‌باشند، بطوری که تغییرات پارامترهای مقاومتی مانند مدول‌یانگ برآورد شده برای پهنه‌ی A حدود ۱/۸۴-۲/۸ گیگاپاسکال و برای پهنه‌ی B حدود ۱/۳۷-۱/۵۵ گیگاپاسکال برآورد گردیده است. هم‌چنین مقاومت تک‌محوری تعیین شده برای این پهنه‌ها به ترتیب ۱/۴۶-۳/۴۷ و ۱/۸۸-۲/۴۹ می‌باشند که نشان دهنده ضعف توده‌سنگ می‌باشند. این مساله در مقاومت تک‌محوری نمونه‌های بکر نیز قابل مشاهده است. پایین بودن کیفیت توده سنگ در پهنه‌های A و B عامل تغییر

گسیختگی مور- کولمب و رفتار الاستوپلاستیک مصالح برای مدل انتخاب شده زیرا در این صورت امکان ترسیم منحنی *SCC-GRC* با پارامترهای ژئومکانیکی قابل اندازه‌گیری مانند مدول الاستیک، نسبت پواسون، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت تک‌محوری فراهم می‌شود (کارانزا- تورس و فایهارست، ۲۰۰۰). انتخاب معیار رفتار مور-کولمب الاستوپلاستیک امکان ارزیابی جزئی رفتار مکانیکی را طی مراحل الاستیک، نقطه تسلیم، پلاستیک، نقطه گسیختگی، مقاومت نهایی و بازمانده را فراهم می‌نماید که می‌تواند در توصیف رفتاری منحنی‌های *CCM* بکار برده شود. شرایط مرزی مدل با مدنظر قرار دادن نوع شبیه‌سازی و اصول محیط پیوسته با مرزهای آزاد (مجموعه نقاطی که امکان جابجایی و تغییرشکل در جهات محوری را دارند) و ثابت (امکان جابجایی و تغییرشکل صلب گردیده است) تعریف شده که مرزهای آزاد در این تحلیل، محور حفاری تونل و شعاع حفاری تونل می‌باشد. به منظور تعیین خصوصیات مصالح از نتایج آزمایشات ژئومکانیکی و پارامترهای مقاومتی برای پهنه‌های *A* و *B* استفاده شده است. از آنجایی که تغییرات ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها نسبتاً وسیع است، بنابراین ۴ بازه تغییرات پارامترهای مقاومتی در نظر گرفته شده که در جدول ۳ ارائه شده است. هدف از بازه‌بندی مقاومتی مصالح میزبان تونل دستیابی به مناسب‌ترین منحنی‌های *CCM* برای طراحی سیستم نگهداری و تعیین فشار روباره است. نتایج حاصل از حل مدل مکانیکی برای ارزیابی تغییرشکل‌های پلاستیک، برآورد جابجایی‌های صورت گرفته در محدوده تونل، تغییرات میدان تنش و ترسیم نمودارهای *CCM* به صورت مقایسه‌ای برای رویکردهای تحلیلی و عددی بکار برده می‌شوند. در نهایت با انجام مقایسه برآوردهای صورت گرفته، سیستم نگهداری مناسب برای این پهنه‌ها تعیین می‌گردد.

۴- نتایج و بحث

می‌دانیم که تغییرشکل‌های پلاستیک و کرنش پیوسته در میدان تنش برجا در حول تونل در مقطع و پروفیل طولی تونل قابل ارزیابی است. شکل ۵ شمایی از تغییرات نواحی پلاستیک بصورت محوری و در پروفیل تونل ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مراحل تغییرات

در این راستا با استفاده از روش *CCM* و برآورد منحنی‌های *GRC*، *LDP* و *SCC*، میزان تغییرات ناحیه پلاستیک، میدان تنش و رفتار کرنش پلاستیک تونل تعیین گردیده است. از منحنی *GRC* برای پاسخ زمین نسبت به حفر فضای زیرزمینی و میزان تغییرشکل‌های رخ داده، از منحنی *SCC* برای ارزیابی فشار روباره بر دیواره و صلبیت سیستم نگهداری و از منحنی *LDP* برای تعیین روند تغییرشکلی جداره تونل استفاده شده و نهایتاً تغییرشکل‌های متحمل برای بازه‌های کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت پیش‌بینی شده است.

۳- مواد و روش‌ها

در این مطالعه از رویکردهای تحلیلی و عددی برای ارزیابی تغییرشکل‌های پلاستیک و برآورد جابجایی‌ها اطراف تونل گلاب ۲ استفاده شده است. بدین منظور با بکارگیری نمودارهای رفتاری تهیه شده برای مقاطع اصلی مورد بررسی، منحنی پروفیل *LDP* برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی و تغییر شکل جداره تونل برای بازه‌های کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت پیش‌بینی گردیده است. در این راستا ابتدا با در نظر گرفتن خصوصیات هندسی و ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ میزبان تونل، شبیه‌سازی‌های تحلیلی دونکان- فاما (دونکان- فاما، ۱۹۹۳) با نرم‌افزار *RocSupport* (راکساینس، ۲۰۱۰) و روش‌های عددی تفاضل محدود به وسیله نرم‌افزار *FLAC^{2D}* (آیتسکا، ۲۰۰۶) صورت پذیرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای ترسیم نمودارهای طراحی مبتنی بر رویکرد *CCM* (منحنی‌های *GRC*، *LDP* و *SCC*) بکار گرفته شده و تاثیر تغییرشکل‌های پلاستیک و گسترش نواحی پلاستیک در اطراف تونل ارزیابی شده و با تعریف پروفیل طولی، تغییرات محوری تونل بررسی شده است.

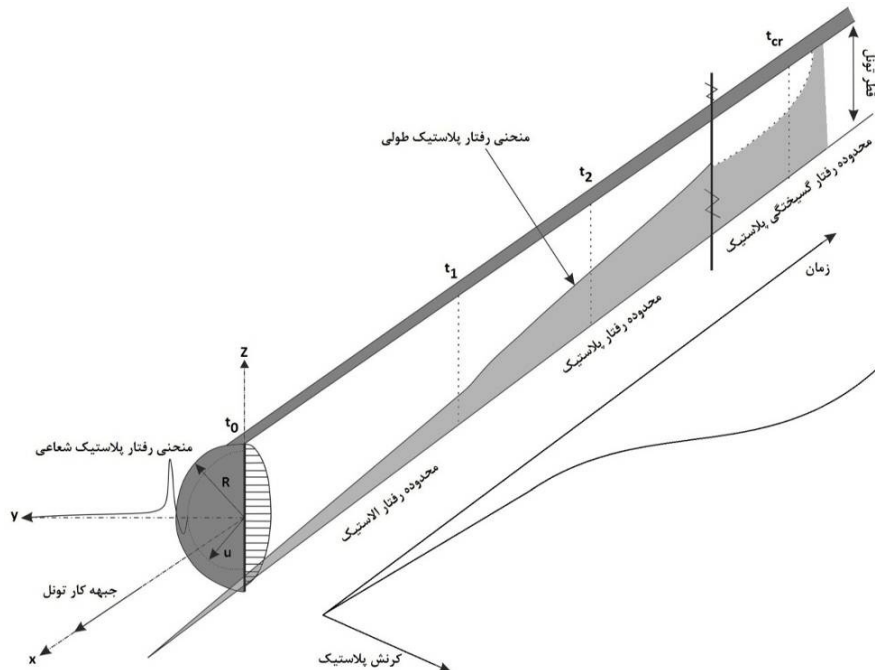
به طور کلی مراحل مدل‌سازی در این مطالعه به چهار گروه اصلی شامل تعیین مدل هندسی، تعیین مشخصات توده‌سنگ و شرایط مرزی، تعیین مدل رفتاری و حل مدل مکانیکی، قابل دسته‌بندی است. در تهیه مدل هندسی برای پهنه‌های مورد بررسی، خصوصیات هندسی تونل (مانند قطر دهانه، وضعیت حفاری، مقطع تونل، توپوگرافی محیط) و شرایط ناپیوستگی توده‌سنگ مدنظر قرار گرفته است. با توجه به ماهیت رفتاری مصالح، مدل

ژئومکانیکی توده سنگ میزبان می‌تواند در تعریف موقعیت و روند کرنش پلاستیک و نتیجه آن سیستم نگهدارنده موفق مفید باشد.

رفتاری از الاستیک تا گسیختگی (یا لهیدگی) یک تابع وابسته به زمان بوده و با تغییرات در توده سنگ و مقاومت آن‌ها ارتباط مستقیم دارد. تغییر در گستره مشخصی از حداقل و حداکثر مقادیر برآورد شده برای خصوصیات

جدول ۳. پارامترها و خصوصیات ژئومکانیکی بکار گرفته شده در این تحلیل

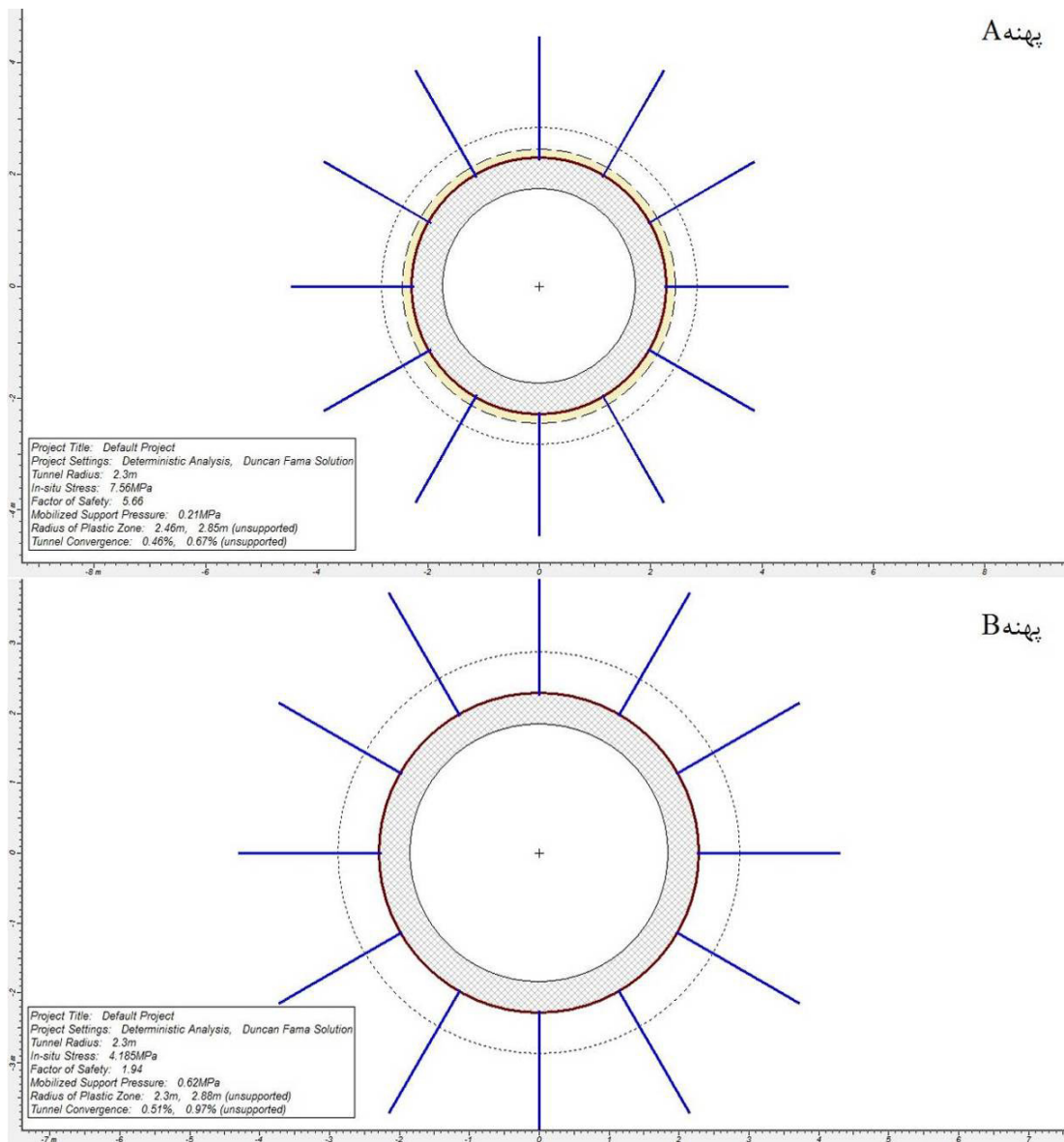
پهنه B			پهنه A			واحد	پارامتر
سری B3	سری B2	سری B1	سری A3	سری A2	سری A1		
۲۰	۱۸/۵	۱۷	۲۰	۱۹	۱۸	kN/m^3	وزن مخصوص
۲۸	۲۸	۲۷	۳۹	۳۳	۲۶	deg.	زاویه اصطکاک
۴۲۷	۴۰۷	۳۸۷	۶۴۲	۵۷۷	۵۱۲	kPa	چسبندگی
۱/۵۵	۱/۴۶	۱/۳۷	۳/۸	۲/۸۲	۱/۸۴	GPa	مدول یانگ
۲/۳۴	۲/۲۱	۲/۰۷	۶/۳۳	۴/۷۰	۳/۰۶	GPa	مدول بالک
۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۴۹	۱/۳۵	۱/۰۰۷	۰/۶۵	GPa	مدول برشی
۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	ضریب k_0
۴/۱۸	۴/۱۸	۴/۱۸	۷/۵۶	۷/۵۶	۷/۵۶	MPa	تنش برجا (σ_0)



شکل ۵. شمایی از وضعیت تغییرات کرنش پلاستیک و توسعه نواحی پلاستیک حول محوری تونل

پلاستیک که نتیجه کرنش پلاستیک پیوسته در توده میزبان تونل است، در پهنه B بیش از پهنه A می‌باشد. این مساله نشان‌دهنده تغییر شرایط توزیع تنش برجا، مقاومت توده سنگ میزبان و تاریخچه تنش حول دیواره‌های تونل در این پهنه‌ها است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲، خصوصیات ژئومکانیکی مصالح توده میزبان در این پهنه‌ها و به خصوص پهنه B چنین رفتاری قابل انتظار بوده است.

با در نظر گرفتن ویژگی‌های رفتار مکانیکی و داده‌های مربوط به جدول ۳، شرایط محیط حفاری برای برآورد منحنی‌های CCM و شبیه‌سازی ناحیه پلاستیک برای پهنه‌های A و B با رویکردهای تحلیلی و عددی تفاضل محدود توسط نرم‌افزارهای $FLAC^{2D}$ (آیتسکا، ۲۰۰۶) و RocSupport (راکساینس، ۲۰۱۰) صورت گرفته است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی که در شکل‌های ۶ و ۷ بر پایه مدل‌های DFM و FDM ارائه گردیده، گسترش ناحیه

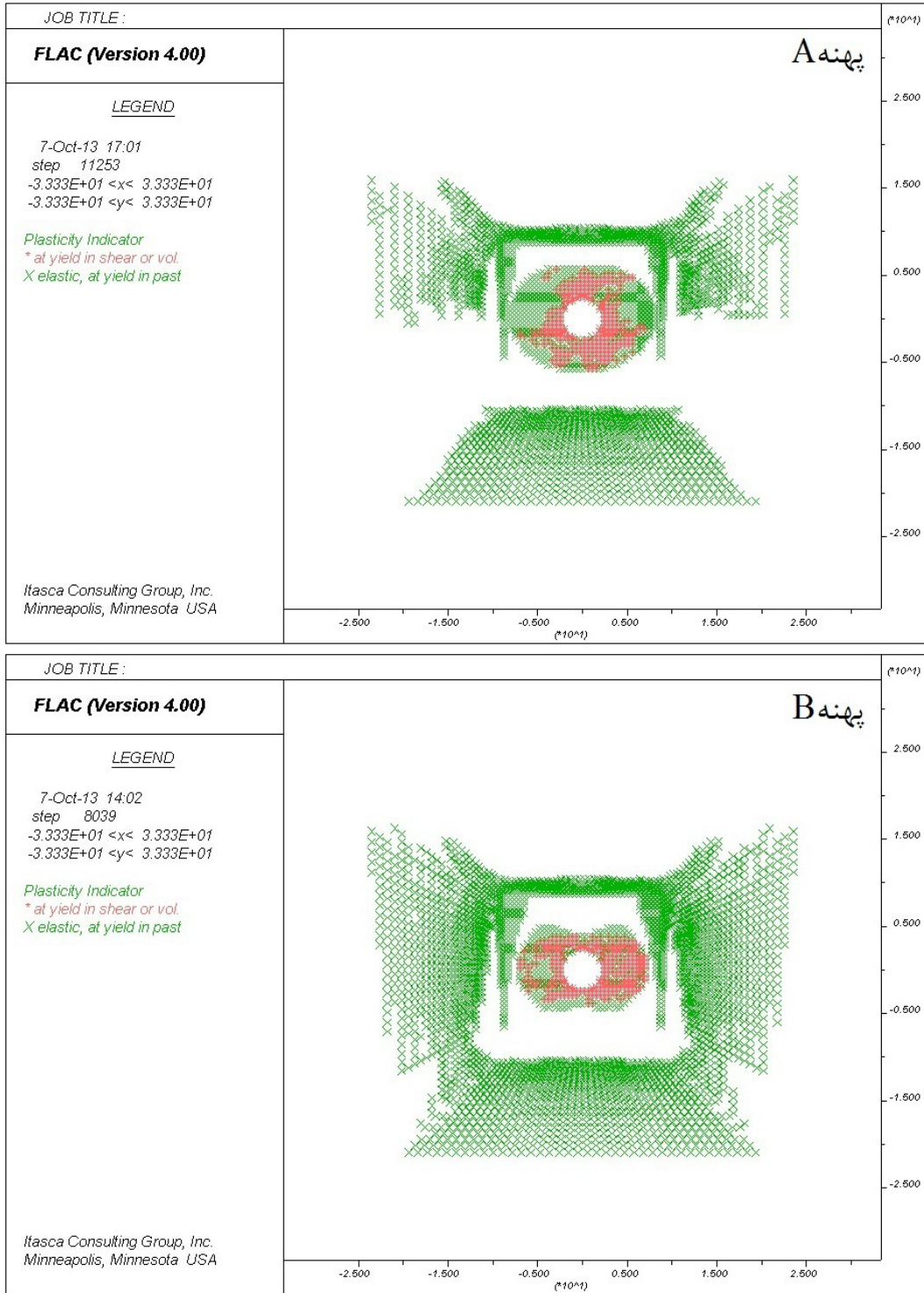


شکل ۶. نتایج شبیه‌سازی ناحیه پلاستیک مبتنی بر DFEM برای پهنه‌های A و B

میزبان تونل توسط رویکردهای CCM فراهم می‌آورد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، تحلیل توسط روش‌های CCM نیازمند برآورد منحنی‌های تغییرشکلی شامل GRC، SCC و LDP می‌باشد که باید از نتایج شبیه‌سازی در بخش دیواره تونل استخراج گردد. نتایج حاصل از ترسیم نمودارهای تحلیل CCM بر پایه داده‌های شبیه‌سازی توسط مدل‌های DFEM و FDM به شرح شکل‌های ۸ تا ۱۰ می‌باشد.

ایجاد کرنش پلاستیک در محدوده تونل وابسته به زمان است، لذا لحاظ نمودن مدل مبنای تحلیل برای چنین شرایط جهت تحلیل کرنش پلاستیک تونل مبتنی بر رفتار الاستوپلاستیک مصالح توسط مدل اجسام برورگر^۱ در نظر گرفته شده است. برآورد مدل‌های رفتاری مختلف برای تغییرات وابسته به زمان توسط محققینی همچون مایکل (۲۰۱۴) بیان گردیده است. این مدل رفتاری امکان ارزیابی تغییرات منجر به لهیدگی تحت تاثیر پلاستیک پیوسته وابسته به زمان را برای توده‌سنگ

^۱ Burgers bodies model



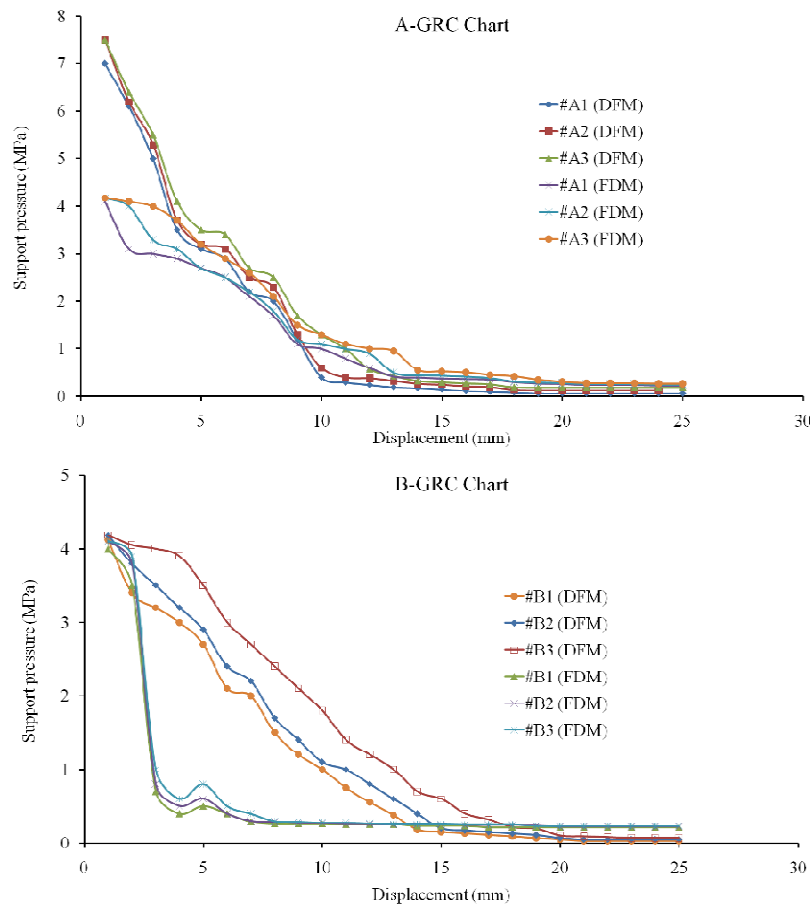
شکل ۷. نتایج شبیه‌سازی ناحیه پلاستیک مبتنی بر FDM برای پهنه‌های A و B

تا ۱۰ میلی‌متری روند مشابهی را دنبال می‌کند. وجود تغییرات فشار بار اولیه در ابتدای تحلیل توسط FDM و DFM در حدود ۴ تا ۸ مگاپاسکال نشان می‌دهد که روش عددی، فشار بار کمتری را برآورد نموده است. این

همان طور که مشاهده می‌شود، تغییرات منحنی GRC برآورد شده با DFM و FDM برای پهنه A تا حدودی روند یکسانی را در جابجایی دیواره نشان می‌دهد. دیواره در جابجایی ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متری یکنواخت شده و بازه ۵

موضوع برای پهنه B متفاوت بوده و تغییرات افت بیش‌تری را نشان می‌دهد. روش DFM جابجایی یکنواخت را در ۱۵ میلی‌متر و FDM در ۷ میلی‌متر نشان می‌دهد. هم‌چنین افت شدید فشار بار در ۳ میلی‌متر جابجایی نشان‌دهنده تمرکز تنش بیش از حد در محدوده حفاری و عدم تحمل دیواره بدون نگهداری در این پهنه است. با توجه به این منحنی بیش‌ترین فشار داخلی برآورد شده $۷/۵۶$ و $۴/۱۸$ مگاپاسکال است. منحنی SCC ترسیم شده برای پهنه‌ها که بر پایه تعریف سیستم نگهداری در مقابل منحنی GRC برآورد شده است، نشانگر مهار فشار نگهداری برابر $(DFM) ۲/۲$ و

موضوع برای پهنه B متفاوت بوده و تغییرات افت بیش‌تری را نشان می‌دهد. روش DFM جابجایی یکنواخت را در ۱۵ میلی‌متر و FDM در ۷ میلی‌متر نشان می‌دهد. هم‌چنین افت شدید فشار بار در ۳ میلی‌متر جابجایی نشان‌دهنده تمرکز تنش بیش از حد در محدوده حفاری و عدم تحمل دیواره بدون نگهداری در این پهنه است. با توجه به این منحنی بیش‌ترین فشار داخلی برآورد شده $۷/۵۶$ و $۴/۱۸$ مگاپاسکال است. منحنی SCC ترسیم شده برای پهنه‌ها که بر پایه تعریف سیستم نگهداری در مقابل منحنی GRC برآورد شده است، نشانگر مهار فشار نگهداری برابر $(DFM) ۲/۲$ و



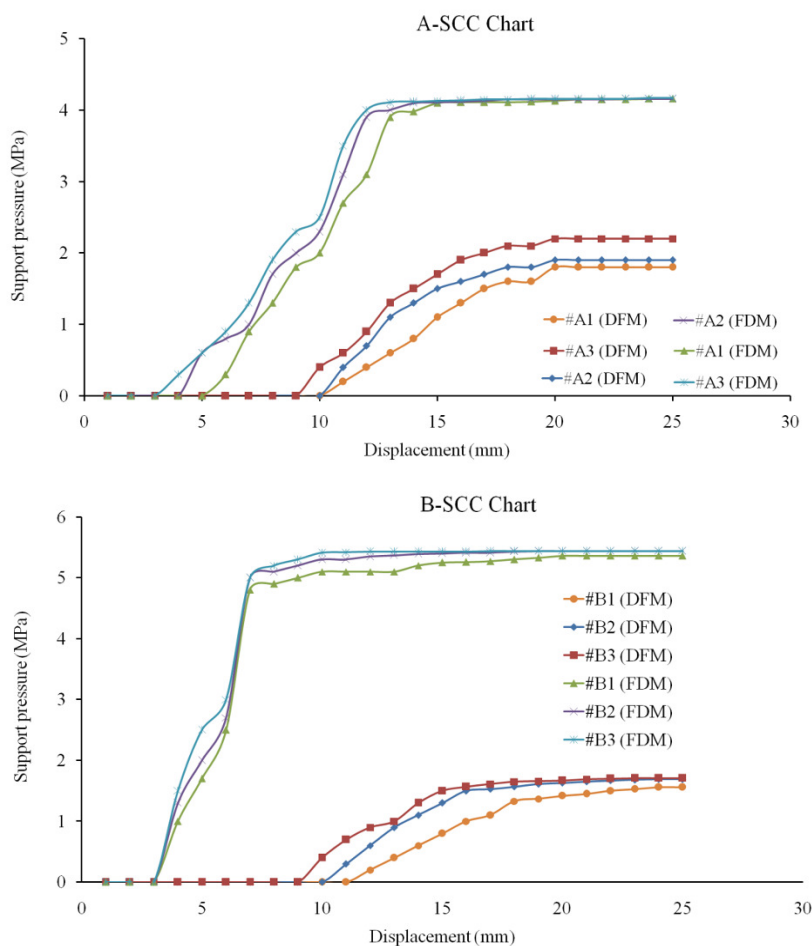
شکل ۸. نتایج تحلیل به روش‌های DFM و FDM برای تعیین جابجایی (GRC) در جبهه کار تونل

محووری دیواره تونل در جبهه کار (که نشان‌دهنده مراحل اولیه) می‌باشد، شبیه‌سازی گردیده است. با گذر زمان و پیش‌روی تونل، تمرکز تنش در دیواره‌های تونل افزایش یافته و سبب افزایش تنش در دیواره‌ها می‌گردد. بعد از گذشت زمانی معادل t_1 (شکل ۵)، مصالح میزبان با گذر از آستانه تسلیم الاستیک، تغییرشکل پلاستیک از خود

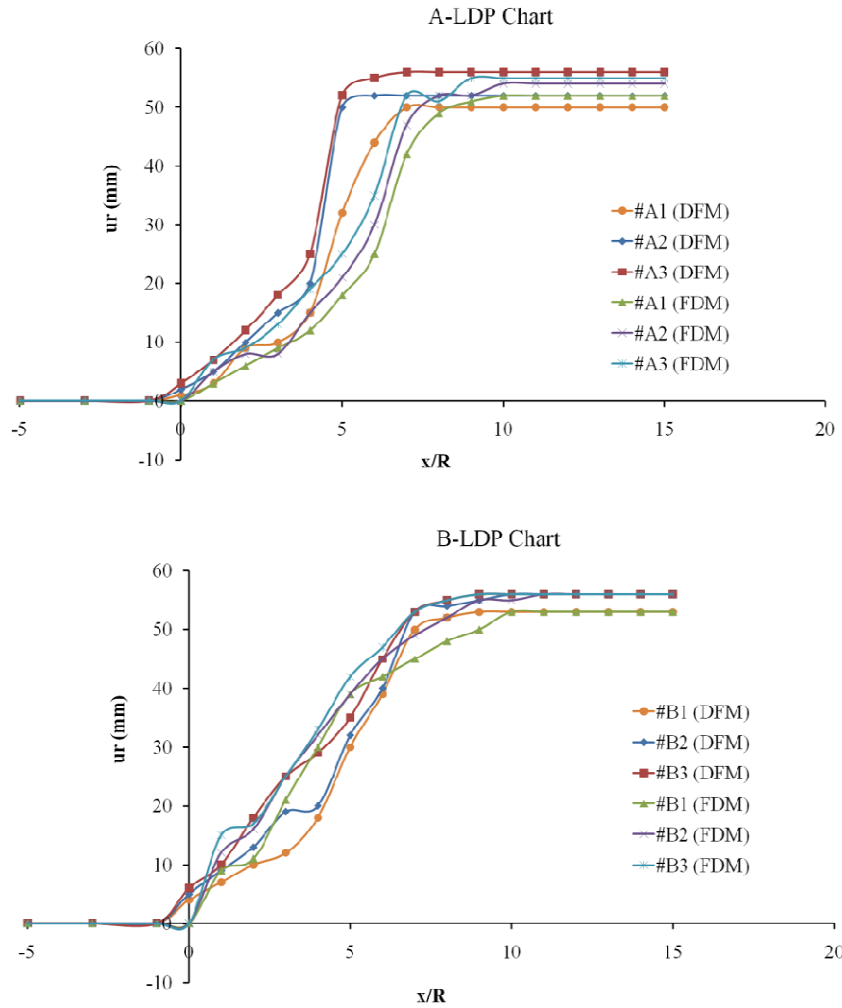
اولین مساله در روند کرنش پلاستیک وابستگی به زمان این پدیده است. در دیواره‌های تونل تغییرات کرنش پلاستیک از مرحله اولیه (تغییرشکل الاستیک) تا مرحله بحرانی (گسیختگی پلاستیک) با گذر زمان طی بازه‌های چندین دقیقه‌ای تا چندین روز رخ می‌دهد. بدین منظور با مد نظر قرار دادن مدل رفتاری بروگر، تغییرات جانبی و

برابر تنش مماسی در مرز دیواره‌ها خواهد بود). اما در واقع به دلیل صلبیت بیش‌تر سیستم نگهدارنده *TBM* نسبت به روش‌های دیگر، این مساله متفاوت‌تر بوده و کارایی مدل‌های *CCM* مناسب می‌باشد. شکل ۱۱ تغییرات میدان تنش بر جای بدست آمده طی عملیات حفاری با *TBM* را نشان داده است. در این شکل، p فشار روباره یا تنش نگهداری، q تنش انحرافی در مرز دیواره‌ها می‌باشد. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از تحلیل *CCM* و طبقه‌بندی بازه‌های زمانی به صورت بازه کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت؛ رفتار مکانیکی و کرنش پلاستیک دیواره‌های تونل برای بازه‌های فوق قابل پیش‌بینی خواهد بود. شکل ۱۲ نتایج حاصل از پیش‌بینی رفتار پلاستیک و توسعه نواحی پلاستیک را دیواره‌های تونل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، میزان تغییرات و گسترش ناحیه پلاستیک قبل و بعد از نصب سیستم نگهدارنده به شرح جدول ۴ می‌باشد.

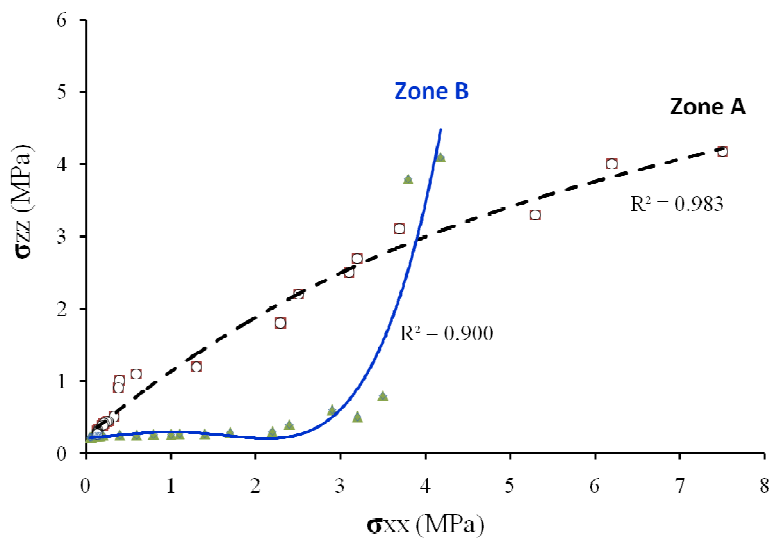
نشان می‌دهند. این رفتار تا زمان بحرانی (t_{cr}) بصورت تغییر شکل پلاستیک بوده و با گذر از زمان بحرانی، گسختگی در تونل رخ می‌دهد. این گسختگی پدیده‌هایی مانند ریزش، لهیدگی و خزش را توجیه می‌کند. در این راستا برای زمان بحرانی (بینهایت نظری) یا زمان یکنواختی شیب منحنی مدنظر قرار گرفته شده است. جنبه دیگر بکارگیری رویکردهای *CCM* ارزیابی تغییرات تنش برجا و برآورد بزرگای میدان تنش در دیواره‌ها و سقف تونل می‌باشد (σ_{xx} و σ_{zz}). همان‌طور که بر پایه قوانین کرنش^۱ (اوکی و همکاران، ۲۰۱۸) مشاهده می‌گردد، در زمان حفاری، با تغییر در میدان تنش برجا، سیستم اقدام به بازآرایی المان‌های تنش می‌نماید. این تغییرات در دیواره و سقف تونل بصورت جابجایی‌های پلاستیک مشاهده می‌گردد. هنگامی که حفاری با *TBM* و زمان حفاری یک متر در هر سیکل باشد، صورت می‌پذیرد؛ تنش انحرافی در سقف و دیواره باید با فشار برجا برابر گردد (در این حالت p برابر تنش شعاعی و $2p$



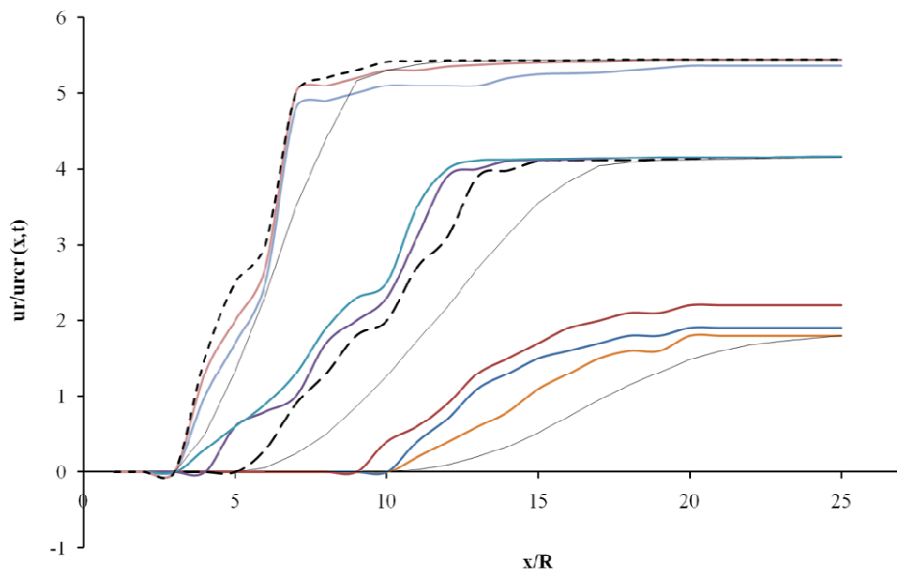
شکل ۹. نتایج تحلیل به روش‌های *DFM* و *FDM* برای تعیین فشار نگهداری (*SCC*) دیواره تونل



شکل ۱۰. نتایج تحلیل به روش‌های *DFM* و *FDM* برای تعیین تغییرات پروفیل طولی (*LDP*) در محور تونل



شکل ۱۱. نتایج حاصل از تغییرات میدان تنش برجا در مرحله حفاری با *TBM*

شکل ۱۲. منحنی LDP پیش‌بینی شده برای بازه‌های زمانی مختلفجدول ۴. نتایج حاصل از تحلیل‌های DFM و FDM برای پهنه‌های A و B

پهنه B	پهنه A	واحد	پارامترهای تحلیل	
۲/۸۸	۲/۸۵	m	گسترش ناحیه پلاستیک پیش از نصب سیستم نگهدارنده	روش DFM
۲/۳۰	۲/۴۶	m	گسترش ناحیه پلاستیک پس از نصب سیستم نگهدارنده	
۴/۱۸	۷/۵۶	MPa	فشار داخلی	
۱۳۵	۱۳۵	mm	جابجایی دیواره تونل پس از نصب سیستم نگهدارنده	
۶۰	۳۰	mm	جابجایی در سقف تونل در راستای قائم (پیش از نصب سیستم نگهدارنده)	روش FDM
۵۰	۴۰	mm	جابجایی در دیواره تونل در راستای افقی (پیش از نصب سیستم نگهدارنده)	
۱۵	۲۰	mm	جابجایی در سقف تونل در راستای قائم (پس از نصب سیستم نگهدارنده)	
۱۰	۱۵	mm	جابجایی در دیواره تونل در راستای افقی (پس از نصب سیستم نگهدارنده)	

۵- نتیجه‌گیری

تونل گلاب ۲ با هدف تامین بخشی از آب مورد نیاز شهر اصفهان با مقطع دایره‌ای به طول ۱۷ کیلومتر به صورت تمام مقطع با TBM حفاری شده است. در مسیر تونل ۱۵ پهنه مختلف زمین‌شناسی بر پایه خصوصیات لیتولوژی، ساختاری و زمین‌شناسی مهندسی تعیین شده است. پهنه‌های ۲ و ۱۰ به دلیل پایین بودن خصوصیات ژئومکانیکی به عنوان پهنه‌های بحرانی تونل تعیین شده و با عنوان پهنه‌های A و B نامگذاری شده و در این مطالعه بر روی آن‌ها تمرکز شده است. با توجه به جنس سنگ‌های این دو پهنه که شیلی-سیلتستونی با مقاومت پایین می‌باشند. رفتار کرنش پیوسته، توسعه نواحی پلاستیک و تغییرات میدان تنش برجا و متعاقب آن تغییر شکل در دیواره‌های تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

در این راستا رویکرد تحلیل همگرایی همجواری (CCM) مبتنی بر روش‌های حل دونکان-فاما (DFM) و روش‌های عددی تفاضل محدود (FDM) برای برآورد رفتار تغییرشکلی، ارزیابی میدان تنش، گسترش ناحیه پلاستیک توده‌سنگ میزبان تونل استفاده شده است. روند تحلیل و شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای $RocSupport$ و $FLAC^{2D}$ صورت گرفته که در ۴ مرحله اصلی شامل مدل‌سازی هندسی، تعیین خواص ژئومکانیکی و شرایط مرزی، تعیین مدل رفتاری و حل مدل مکانیکی شبیه‌سازی گردیده است. بر پایه تحلیل‌ها، پهنه B نسبت به پهنه A دارای ناحیه تغییرشکل پلاستیک بیش‌تری است که ناشی از تغییرات پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ و نوع رفتار پلاستیک این پهنه‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی

- Fdez-Manín, G (2009) Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(6): 689-705.
- Brown, E. T., Bray, J. W., Ladanyi, B. and Hoek, E (1983) Ground response curves for rock tunnels, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(1): 15-39.
- Cai, Y., Jiang, Y., Djameluddin, I., Iura, T. and Esaki, T (2015) An analytical model considering interaction behavior of grouted rock bolts for convergence– confinement method in tunneling design, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 76: 112-126.
- Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C (2000) Application of the convergence confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek Brown failure criterion, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2): 187-213.
- Cui, L., Zheng, J., Zhang, R. and Lai, H (2015) A numerical procedure for the fictitious support pressure in the application of the convergence–confinement method for circular tunnel design. *Int. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78: 336-349.
- Duncan-Fama, M. E (1993) Numerical Modelling of Yield Zones in Weak Rocks, In: Hudson, J. A (ed.); *Comprehensive Rock Engineering*, Pergamon, Oxford, 49-75.
- Fang, Q., Zhang, D., Zhou, P. and Wong, L. N. Y (2013) Ground reaction curves for deep circular tunnels considering the effect of ground reinforcement, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60: 401-412.
- Fletcher, C. J. N (2016) *Geology for Ground Engineering Projects*, CRC Press, 309 p.
- González-Cao, J., Varas, F., Bastante, F. G. and Alejano, L. R (2013) Ground reaction curves for circular excavations in non-homogeneous, axisymmetric strain-softening rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(6): 431-442.
- Itasca (2006) *FLAC^{2D}–Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.00*, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- Janda, T., Šejnoha, M. and Šejnoha, J (2013) Modeling of soil structure interaction during tunnel excavation: An engineering approach. *Advances in Engineering Software*, 62(63): 51-60.
- Mitchell, G (2014) *Rheology: Theory, Properties and Practical Applications*, Nova Science Pub Inc, 480 p.
- Oke, J., Vlachopoulos, N. and Diederichs, M (2018) *Improvement to the Convergence*
- مهندسی و ژئوتکنیکی صورت گرفته برای این دو پهنه تلفیق شده و در تهیه سیستم نگهداری اولیه تونل استفاده شده است. بر پایه نتایج مدل‌های تحلیلی و عددی که برای ۴ بازه مقاومتی مصالح طراحی و منحنی‌های CCM ترسیم گردیده، مشخص شده که این پهنه‌ها به ترتیب تحت فشار داخلی ۷/۵۶ و ۴/۱۸ مگاپاسکال بوده و ناحیه تغییرشکل پلاستیک حدود ۲/۸۵ و ۲/۸۸ متری را در اطراف تونل ایجاد می‌نمایند. با اجرا مهار و با قبول ۱۰ میلی‌متر جابجایی می‌توان کاهش پلاستیک را به ۲/۴۳ و ۲/۳۰ متر کاهش داد. در این شبیه‌سازی رویکرد عددی نسبت به روش تحلیلی دارای افت بوده و مهار را با صلبیت بیش‌تری دنبال می‌کند، اما روند CCM با شرایط محیطی همخوانی بهتری دارد. از سوی دیگر با مطالعه نمودارهای رفتاری مبتنی بر LDP، جابجایی تقریباً یکسانی را برای بازه‌های کوتاه مدت (۷ روزه)، میان مدت (۱۶ روزه) و بلند مدت (۲۴ روزه) برآورد نموده‌اند. با ارزیابی میدان تنش برجا برای پهنه‌های ۲ و ۱۰ مشخص گردیده که تغییرات میدان تنش در محدوده پهنه ۱۰ بصورت ناگهانی بوده اما پهنه ۲ تغییرات پیوسته تغییرشکلی را دنبال می‌کند.

منابع

- آقائباتی، ع (۱۳۸۵) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۸۰۷ ص.
- شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب (۱۳۸۸-الف)، طرح آبرسانی از اصفهان بزرگ به سد زاینده رود: گزارش زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، ۸۵ ص.
- شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب (۱۳۸۸-ب) طرح آبرسانی از اصفهان بزرگ به سد زاینده رود: گزارش زمین‌شناسی عمومی، ۱۲۰ ص.
- نیکویخت، ش (۱۳۹۲) بررسی پارامترهای توده‌سنگ‌های میزبان تونل انتقال آب گلاب ۲ به منظور برآورد بار سنگ و طراحی سیستم نگهدارنده، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه یزد، ۱۷۳ ص.
- نیکویخت، ش.، آذرافزا، م.، معماریان، ح.، مهرنهاد، ح (۱۳۹۳) برآورد میزان سختی و توان سایش‌پذیری قطعات تشکیل دهنده کنگلومرایی در مسیر تونل انتقال آب گلاب ۲ توسط آزمون سایش سورشار (CAI)، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، جلد ۹، شماره ۱۷، ص. ۲۴-۱۶
- Alejano, L. R., Rodríguez-Dono, A., Alonso, E. and

- Confinement method: Inclusion of Support Installation Proximity and Stiffness. Rock Mechanics and Rock Engineering, 51(5): 1495-1519.*
- Oreste, P (2009) *The convergence-confinement method: roles and limits in modern geomechanical tunnel design, American Journal of Applied Sciences, 6(4): 757-771.*
- Paraskevopoulou, C. and Diederichs, M (2018) *Analysis of time-dependent deformation in tunnels using the Convergence-Confinement Method, Tunnelling and Underground Space Technology, 71: 62-80.*
- Rocscience (2010) *RocSupport –Rock support interaction and deformation analysis for tunnels in weak rock, Version 3.0, Toronto, Canada.*
- Singh, B. and Goel, R. K (2011) *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundations and Landslides, Butterworth-Heinemann, 384 p.*
- Vrakas, A (2017) *A finite strain solution for the elastoplastic ground response curve in tunnelling: rocks with non-linear failure envelopes. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 41(7): 1077-1190.*
- Vrakas, A. and Anagnostou, G (2014) *A finite strain closed-form solution for the elastoplastic ground response curve in tunnelling. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 38(11): 1131-1148.*
- Wang, S., Yin, X., Tang, H. and Ge, X (2010) *A new approach for analyzing circular tunneling strain-softening rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47: 170-178.*

Deformation analyses and plastic zone expansion in the tunnel Isfahan Golab 2 rock mass by convergence-confinement and numerical methods

Sh. Nikoobakht¹, H. Mehrnahad², M. Azarafza³ and E. Asghari-Kaljahi^{4*}

1, 2- Dept., of Geology, Faculty of sciences, University of Yazd, Yazd

3- Dept., of Geology, Faculty of sciences, University of Isfahan, Isfahan

4- Dept., of Earth Sciences, Faculty of sciences, University of Tabriz, Tabriz

* e-asghari@tabrizu.ac.ir

Received: 2019/8/2 Accepted: 2019/10/30

Abstract

In this study, analytical Duncan-Fama (DFM) and numerical finite difference (FDM) methods based on convergence-confinement (CCM) procedure was used to deformation analyses, stress field and plastic zone expansion estimation for rock mass of tunnel Golab 2 in Isfahan which simulated by RocSupport and FLAC^{2D} softwares. The CCM approach utilizes ground response curves (GRC), longitudinal deformation profile (LDP), and support characteristic curves (SCC) to evaluate tunnel wall displacements and offer the most appropriate maintenance. The simulation is implemented for the most critical tunnel zones (zones 2 and 10 out of 15 zones) which generally consisting of shale with sandstone and siltstone geological units. In term of engineering geology and geomechanical studies, the zones have variable features and highly tectonised. This has a significant effect on the mechanical behavior of the geo-materials and causes squeezing on the support system. The geotechnical investigation results are shown that these zones (especially zone 10) have lowest strength mechanical parameters which main focus of this study is on these zones. Based on the analytical and numerical models were obtained for the 4 classes by CCM (GRC-SCC) curves for these intervals, it is found that these zones are under internal pressure about 7.56 and 4.18 MPa, respectively. Also, produce a plastic zone of about 2.85 and 2.88 meters. As results implementing maintenance structure with a permitted 10 mm displacement can reduce the plastic zone to 2.43 and 2.30 meters in the studied zones as well as provided structural stability in 15 mm. In conditional simulation, although the numerical method rather than analytical method is more falls and followed greater rigidity support system, but the CCM process is better suited to environmental conditions. On the other hand, by studying LDP-based behavioral diagrams, the estimated displacement is approximately the same for the short-term (7 days), mid-term (16 days), and long-term (24 days) intervals. As evaluating the in-situ stress field for zones 2 and 10, it was found that the stress field variations in zone 10 was sudden but zone 2 was followed by continuous deformation changes.

Keywords: Convergence-confinement method (CCM), Ground response curve (GRC), Support characteristic curves (SCC), Longitudinal deformation profile (LDP), Tunnel Golab 2.