

تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهداری تونل به روش المان مجزا و مقایسه نتایج موردی آن با روش تفاضل محدود (مطالعه موردی: تونل پردیس)

مقاله علمی - پژوهشی

روح الله صارم، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران
محسن عموزاده عمرانی*، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران
رضوان باباگلی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mo.Omrani@iaou.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

صفحه ۳۰۸-۲۸۳

چکیده

در سال‌های اخیر، به دنبال نیاز روز افزون به فضاهای زیر زمینی با ابعاد بزرگتر و اعماق بیشتر، ضرورت شناسایی دقیق شرایط زمین آشکار شده است. بررسی‌های زمین شناسی مهندسی فضاهای زیر زمینی با استفاده از اکتشافات صحرایی و ژئوفیزیکی، مطالعات دفتری و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام می‌گیرد. در این راستا، حفاریات زیر زمینی را می‌توان به سه گروه تونل‌ها، مغارها و معادن طبقه بندی نمود. تونل‌های شهر جدید پردیس بخشی از پروژه دسترسی فازهای ۵، ۹، ۱۱ و ۱۱ شهر جدید پردیس محسوب می‌شوند. که با هدف تامین دسترسی این فازها به طور مستقل به آزادراه و بزرگراه تهران- پردیس و محورهای شریانی درجه یک فازهای ۳، ۲، ۱ و ۴ شهر جدید پردیس اجرا می‌شود. با توجه به این‌که از لحاظ زمین شناسی محیط تونل‌های شهر جدید پردیس به صورت لایه بندی و تحت تاثیر عوامل تکنیکی بوده و از طرفی نتایج همگرایی سنجی و همینطور ریزش‌های صورت گرفته با مطالعات اولیه همخوانی نداشته و اکثر ریزش‌های صورت گرفته به صورت گوه ای و یا از گسترش ریزش‌های گوه ای قبلی منتج شده اند، بنابراین، با توجه به تمامی شواهد، احتمال ناپیوسته بودن محیط به شدت محتمل شد. هدف از این پژوهش، کاربرد روش‌های عددی مختلف جهت بررسی و تحلیل پایداری تونل‌های پردیس در سازند کرج با استفاده از روش‌های عددی تفاضل محدود در محیط پیوسته (نرم افزار FLAC) و المان مجزا در محیط ناپیوسته (نرم افزار UDEC) می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا تحلیل پایداری تونل‌های پردیس انجام و با اعمال یک سیستم نگهداری بینه با استفاده از روش‌های مختلف عددی مدل سازی شدند. در نهایت نتایج حاصل از روش‌های مختلف، با نتایج ابزار دقیق مقایسه شدند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل ساخته شده توسط نرم افزار UDEC در مقایسه با نرم افزار FLAC، به شرایط واقعی زمین نزدیکتر است. با توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه مقدار جابجایی‌های رخ داده در اطراف فضای حفاری شده می‌توان گفت که این محیط دارای یک رفتار ناپیوسته است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پایداری، تونل پردیس، تفاضل محدود، المان مجزا، UDEC، FLAC

۱- مقدمه

عددی، روش تجربی و مدل‌های فیزیکی. روش‌های عددی که در دسته روش‌های تحلیلی-محاسباتی محسوب می‌شوند در چهاردهمی گذشته توسعه‌ی زیادی پیدا کرده‌اند. این روش‌ها به واسطه‌ی پیشرفت سریع فن‌آوری کامپیوتری و قابلیت دسترسی

یکی از مهمترین بخش‌های سازه‌های مسی‌های مورد طراحی در مناطق کوهستانی تونل‌ها می‌باشند که با توجه به تکنولوژی روز روش تحلیل پایداری فضا‌های زیر زمینی به چهار روش مختلف تقسیم می‌شوند که عبارتند از: روش فرم بسته، روش

به آن در مهندسی، عمومیت یافته‌اند. اساس روش‌های عددی شبیه‌سازی یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی توسط محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط می‌باشد. اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط بررسی شده و پس از تعیین میزان تغییر شکل در این نقاط، برای سایر نقاط با روش‌های درون‌یابی تغییر شکل محاسبه می‌گردد. روش‌های عددی مختلفی برای حل مسائل بار-تغییر شکل وجود دارند. در اغلب این مسائل محیط دارای شکل دلخواه می‌باشد که تحت بارگذاری ثقلی، نیروهای خارجی، تنش‌های برجا، تغییرات درجه حرارت، فشار سیال، پیش‌تیدگی، نیروهای دینامیکی و ... قرار گرفته و برای پیدا کردن تغییر شکل‌ها، کرنش‌ها و تنش‌ها در توده سنگ‌ها از روابط تنش - کرنش استفاده می‌شود.

به طور کلی محیط‌های مورد مدل‌سازی به سه نوع ۱-سنگ بکر بدون درزه و شکاف ۲- سنگ‌های درزه‌دار ۳- شدیداً خرد شده و یا هوازده تقسیم می‌شوند. به دلیل آنکه رفتار نهایی زمین‌های نوع سوم می‌تواند شبیه به رفتار زمین‌های نوع اول می‌باشد، رفتار این زمین‌ها را شبه پیوسته می‌نامند. رفتار مکانیکی نوع اول به‌کمک تئوری مکانیک محیط پیوسته قابل تحلیل است، در حالیکه برای تحلیل رفتار زمین‌های نوع دوم باید از تئوری‌های مربوط به محیط‌های ناپیوسته استفاده شود. برای تحلیل رفتار نوع سوم می‌توان از تئوری‌های محیط‌های ناپیوسته استفاده کرد. ولی از آنجا که تعیین موقعیت، ابعاد و خواص مکانیکی همه سیستم‌های درزه غیرممکن به‌نظر می‌رسد، بر این اساس، در عمل روش تحلیل محیط‌های ناپیوسته برای تحلیل رفتار این نوع محیط‌ها کاربرد عملی نخواهند داشت. با توجه به اینکه این زمین‌ها تا حدی شبیه به محیط‌های پیوسته رفتار می‌کنند، می‌توان از تئوری محیط‌های پیوسته برای تحلیل رفتار آن‌ها استفاده کرد. باید در نظر داشت که تاثیر ناپیوستگی‌ها به‌صورت مناسبی در مدل‌سازی زمین‌های نوع سوم به‌عنوان یک محیط پیوسته منظور شود. این فرآیند باعث ایجاد مدل پیوسته‌ای معادل با توده‌سنگ ناپیوسته و درزه‌دار خواهد شد. با درنظر گرفتن مطالب بالا، زمین‌های پیوسته و شبه‌پیوسته را می‌توان به‌عنوان اجسام پیوسته درنظر گرفت، در حالی‌که زمین‌های ناپیوسته بایستی با نهایت دقت ممکن و با درنظر گرفتن همه درزه‌ها به‌طور جداگانه، در یک مدل ناپیوسته مدل شوند. بعد از مدل‌سازی زمین، همه مقادیر ثابت‌های مکانیکی و هندسه درزه‌ها را می‌توان با استفاده از تحلیل برگشتی تعیین نمود (دهقان بنادکی، ۱۳۷۹). با توجه به

ناپیوستگی‌های موجود در محیط اطراف تونل پردیس هدف از این تحقیق کاربرد روش‌های عددی جهت بررسی رفتار ناپیوستگی‌ها بر تونل‌های پردیس می‌باشد. برای نیل به این هدف از روش عددی المان مجزا (نرم‌افزار دو بعدی UDEC) جهت مدل‌سازی محیط به صورت ناپیوسته و مقایسه با دیگر روش‌ها استفاده می‌شود. در تونل پردیس با اعمال یک سیستم نگهداری بهینه با استفاده از روش‌های مختلف عددی مدل‌سازی شده (با فرض محیط پیوسته) و در نهایت نتایج حاصل از روش‌های مختلف با نتایج ابزار دقیق مقایسه تا مشخص گردد کدامیک به شرایط واقعی زمین نزدیکتر است. در جریان ساخت بسیاری از پروژه‌های زیرزمینی از جمله تونل‌های شهری یک مشخصه آشکار دیده می‌شود که "هزینه تمام شده معمولاً از پیش‌بینی‌های اولیه بیشتر است". اگر از دلایل غیر فنی نظیر تورم اقتصادی و... بگذریم، بسیاری از دلایل به سوالاتی ختم می‌شوند که پاسخ آن‌ها به مرحله اساسی شناخت شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی بر می‌گردد. ابهامات موجود در این زمینه معمولاً با مقدار و کیفیت مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در فاز مطالعاتی نسبت عکس دارند. به علاوه کمبود یا خطای موجود در اطلاعات ژئوتکنیکی معمولاً پایه و اساس اغلب استدلال‌ها در تغییر مقادیر و هزینه‌ها و ادعای پیمانکاران بوده و هست. مطالعات ژئوتکنیکی در تونل‌ها جهت استفاده کارفرمایان، تصمیم‌گیران، مهندسان طراح و پیمانکاران این عرصه از مهندسی می‌باشد. مطالعات ژئوتکنیک بایستی خیلی زود یعنی از برنامه‌های مفهومی اولیه آغاز شده و طی طراحی، ساخت و حتی پس از ساخت تونل ادامه یابد. در تونل‌های دسترسی فاز ۱۱ شهر جدید پردیس طی مطالعات مرحله اول مجموعاً ۱۲ حلقه گمانه به متر از کل ۷۹۰ متر حفاری گردید. همچنین به دلیل فقدان رخنمون‌های سنگی کافی و مناسب در محدوده مسیر تونل، امکان انجام بررسی‌های درزه‌نگاری قبل از اجرای تونل فراهم نشده است. از این رو با توجه شروع عملیات اجرایی برداشت‌ها به صورت همزمان انجام شده است. (مهندسین مشاور کاوش راه، ۱۳۹۲). با توجه به موارد بالا فرآیندی که این پژوهش سعی دارد تا صورت پذیرد، بدین صورت است که با هدف مطالعات ژئوتکنیکی به منظور تعیین واحدهای اصلی خاک/سنگ و زمین‌شناسی، تعیین واحدهای موضعی زمین‌شناسی شامل مشخصات اولیه خاک/سنگ، تعیین دقیق پارامترهای ژئوتکنیکی سنگ/خاک و تعیین و شناسایی مسائل مشکل‌زا، برداشت پارامترهای واقعی

دارای یک رفتار شبه پیوسته است ولی وجود لایه های ضعیف (به خصوص لایه سیلتستون در سقف مغار اصلی) باعث به وجود آمدن درزه‌هایی با پارامترهای مقاومتی پایین شده است که این عامل باعث باز شدگی درزه‌ها و ناپایداری در این نواحی شده‌اند. مدل سازی با UDEC این موضوع را تایید می‌کند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- موقعیت و مشخصات شهر جدید پردیس

سیاست ایجاد شهرهای جدید با هدف مهار رشد بی رویه جمعیت و کنترل مهاجرت به شهرهای بزرگ، بویژه تهران بر اساس مصوبه شماره ۱۰۸۳۲ مورخ ۶۴/۱۲/۲۰ هیئت وزیران اتخاذ گردید. بر همین اساس هیئت وزیران در تاریخ ۶۸/۱۲/۲۳ احداث شهر جدید پردیس را در فاصله ۲۵ کیلومتری شرق تهران در کنار جاده ترانزیتی تهران - امل و با جمعیت نهایی ۲۰۰,۰۰۰ نفر تصویب کرد. با تصویب طرح تفصیلی شهر پردیس در آذرماه سال (۱۳۸۳) نهایتاً کلیه ساخت و سازها بر اساس ضوابط و مقررات طرح تفصیلی مصوب صورت گرفته و همچنین به دنبال الحاق ۱۵۰۰ هکتار اراضی به محدوده شهر جدید پردیس جهت توسعه فازهای مسکونی، لزوم بازنگری شبکه معابر اصلی شهر جدید پردیس مسجل گردید. با توجه به الحاق ۱۵۰۰ هکتار به طرح مصوب سال ۱۳۸۳ لذا طراحی تقاطع‌های غیر همسطح و راه‌های دسترسی اراضی الحاقی در تابستان سال ۱۳۹۱ به شرکت مهندسی مشاور کاوش راه سپرده شد که طرح مصوب نهایی دارای ۱۲ قطعه پل بزرگ به همراه تونل‌های دو قلو به طول ۸۵۰ متر و با عرض حفاری ۱۶ متر و رمپ و لوپ‌های آن می‌باشد.

۲-۲- موقعیت جغرافیایی تونل‌های شهر جدید پردیس

دهانه ورودی تونل در ۱۰۰ متری بالادست شهرک صنعتی کمرد و دهانه خروجی آن در محل روستای کمرد قرار گرفته است. دسترسی به دهانه ورودی تونل از طریق حدود ۳ کیلومتر جاده آسفالتی از شهرک صنعتی کمرد و دهانه خروجی آن پس از عبور از داخل روستای کمرد و طی مسافت یک کیلومتر جاده خاکی میسر خواهد بود. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به طرح تونل‌های شهر جدید پردیس را نشان می‌دهد.

زمین و در نهایت پایش پاسخ زمین و تونل با هدف مطالعات پایداری تونل به پیش بینی و برطرف کردن هرگونه شرایط مشکل آفرین، ثبت شرایط واقعی و بهینه سازی عمل کرد و پاسخ تونل و همچنین به حفظ ایمنی سازه‌ای در عمل کرد بلند مدت تونل بپردازد. به دنبال تحقیقات پیشگامانه کرش (Kristien, 1898; Hoek, ۱۹۹۵). راه حل‌هایی در خصوص حفاری‌هایی با اشکال مختلف، در صفحات الاستیک، منتشر ساختند. خلاصه مفیدی از این راه حل‌ها و کاربردها در مسائل مکانیک سنگ، توسط براون (Brown et al, 1898; Cheng, Kirsten, 1997; Shen et al, 1997; Carranza-Torres et al, 2000; Jing et al, 1998) منتشر گردید. وی در این رابطه، تمامی این روش‌ها را در سال ۱۹۸۷ در مقاله‌ای با عنوان ((روش‌های تحلیلی و محاسباتی در مکانیک سنگ مهندسی)) ارائه نمود. تحلیل برگشتی نیز به عنوان یک تکنیک غیرمستقیم برای تعیین تنش‌های برجا و خصوصیات مکانیکی توده سنگ و خاک با استفاده از اندازه‌گیری میدانی جابجایی‌ها توسط شی و همکاران (Shi et al, 1989) و ثبت تنش‌ها و کرنش‌ها توسط ماراگنوس (Marangos, 1995). به عنوان یک روش طراحی براساس رفتارنگاری سازه مطرح گردید. روش‌های تحلیل برگشتی به طور بسیار گسترده‌ای در ژئوتکنیک از مسائل ساده الاستیک تا مسائل بسیار پیچیده غیرخطی استفاده می‌شود. باقرزاده و همکاران (۱۳۸۶)، تحقیقی در خصوص کاربرد روش‌های عددی مختلف جهت بررسی رفتار مغار نیروگاه مسجد سلیمان انجام دادند.

برای نیل به این هدف از روش‌های عددی پیوسته مانند المان محدود نرم‌افزار PHASE و تفاضل محدود (نرم افزار (FLAC) استفاده شده است. همچنین از روش عددی المان مجزا (نرم افزار دو بعدی (UDEC) جهت مدل سازی محیط به صورت ناپیوسته و مقایسه با دیگر روش‌ها استفاده شده است. در این تحقیق مغارهای نیروگاه با اعمال یک سیستم نگهداری بهینه با استفاده از روش‌های مدل‌سازی شدند. در نهایت نتایج ابزار دقیق مقایسه شدند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مدل ساخته شده توسط نرم افزار UDEC در مقایسه با دو نرم افزار دیگر، به شرایط واقعی زمین نزدیک‌تر است. با توجه به نتایج بدست آمده از مقایسه مقدار جابجایی‌های رخ داده در اطراف فضای حفاری شده می‌توان گفت که این محیط



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل‌های شهر جدید پردیس

۲-۳- معرفی پروژه تونل‌های پردیس

به منظور جابجایی ترافیک از آزادراه تهران پردیس به اراضی ۵۳۰ هکتاری فاز ۱۱ تونل‌های دوقلو به صورت رفت و برگشت به طول تقریبی ۸۵۰ متر و آزیموت ۳۱۰ درجه و با شیب ۲٪ حفر خواهد شد. تراز ورودی تونل ۱۷۶۲,۱۵۰ متر و خروجی آن ۱۷۷۳,۳۷ متر از سطح دریای آزاد خواهد بود. مقطع حفاری تونل‌ها به صورت نعل‌اسبی به قطر ۹,۲ متر و عرض ۱۶ متر و ارتفاع کلی ۱۴ متر می‌باشد.

۲-۴- مشخصات زمین‌شناسی

۲-۴-۱- بررسی ویژگی‌های توپوگرافی

سیمای توپوگرافیک پردیس و نواحی اطراف آن متأثر از ساختمان زمین‌شناسی منطقه، روند ارتفاعات، شیب عمومی زمین، رودخانه‌ها و مسیل‌های موجود می‌باشد. بعبارت دیگر مورفولوژی و سیمای ناهمواری آن، متأثر از پاره‌ای از عوامل زمین‌ساخت درونی بوده که بعنوان بخشی از زمین البرز مرکزی جنوبی مطالعه می‌شود، همچنین عوامل مورفودینامیک بیرونی از قبیل اقلیم و شبکه آبها، ناهمواری‌های منطقه را دستخوش تغییر نموده و پیکره‌های متفاوتی از قبیل اراضی سخت و سنگلاخی با شیب زیاد، اراضی تپه ماهوری و بریده بریده (سازند هزار دره) و اراضی نسبتاً کوچک بصورت دشت‌های پایکوهی و یا دشت‌های میان کوهی را در منطقه بوجود آورده‌اند. شهر پردیس

۲-۵- زمین‌شناسی

علیرغم وسعت کم متأثر از تمام ویژگی‌های ناهمواری‌های فوق می‌باشد. ساختمان زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه منطبق بر ویژگی‌های زون البرز مرکزی جنوبی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. البرز جنوبی برخلاف البرز مرکزی دارای ساختمان چینه شناسی جوانتری است و رخنمون سازندهای دوران سوم و به ویژه توف‌های سازند کرج بیش از سایر رسوبات در آن گسترش یافته است. البته وجود سیستم‌های گسلی متعدد و رانندگی، رخنمون سنگ‌های قدیمی‌تر و برهم خوردن نظم چینه شناسی منطقه را بدنبال داشته بطوریکه در مجاورت رسوبات آتشفشانی ائوسن (توف‌های سبز سازند کرج) سنگ‌های شیلی و زغالی سازند شمشک مربوط به دوره تریاس بالایی و ژوراسیک بیچشم می‌خورد. در مجموع ژئومورفولوژی منطقه متأثر از مقاومت سازندها در برابر عوامل فرسایش و از طرفی تحت تأثیر تکتونیک درونی شکل گرفته‌اند. بطوریکه کوه‌ها و قله مرتفع در شمال منطقه مورد مطالعه اکثراً متشکل از دولومیت‌های سخت آهکی و یا توده‌های نفوذی و آذرین هستند. همچنین ساختمان ژئومورفولوژی از ساخت‌های چین‌ها و گسل‌های شرقی - غربی تبعیت نموده، بطوریکه در امتداد رانندگی‌ها و گسل‌ها، جنس و ماهیت رسوبات تغییر یافته و به تبع آن توپوگرافی منطقه نیز چهره مخصوص بخود را گرفته است.

۶-۲- ویژگی‌های لرزه‌خیزی محدوده مورد مطالعه

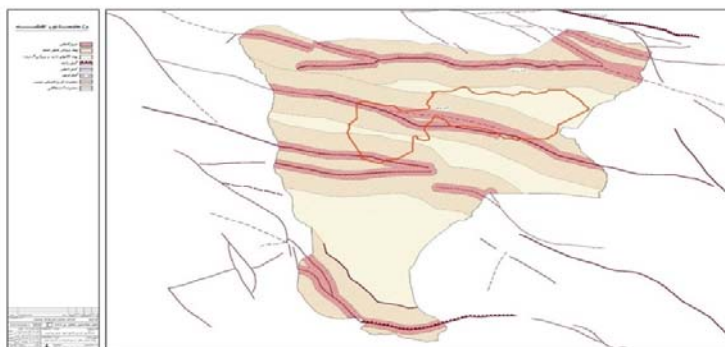
می‌باشد و در یک تقسیم بندی کلی گسله‌های کوتاه‌تر گستره تهران و پیرامون را به سه گروه زیر می‌توان تقسیم نمود.

بررسی ویژگی‌های سایز موتکتونیکي محدوده مورد مطالعه نشان از گسترش تعدادی گسل‌های اصلی و فرعی در این محدوده دارد. گسله‌های فوق اغلب از نوع گسله‌های کوتاه‌تر

-گسله‌های اصلی و لرزه‌زا (با درازای بیش از ۱۰ کیلومتر)

-گسله‌های متوسط (با درازای میان ۲ تا ۱۰ کیلومتر)

-گسله‌های فرعی (کوتاه‌تر از ۲ کیلومتر) شکل ۲ پهنه‌بندی خطر زمین لرزه در گستره شهر پردیس و پیرامون آنرا با توجه به موقعیت گسل‌های موجود نشان می‌دهد.

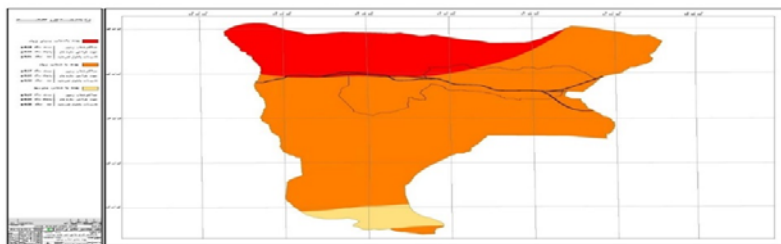


شکل ۲. پهنه بندی خطر زمین لرزه در گستره شهر پردیس و پیرامون آنرا با توجه به موقعیت گسل

۷-۲- پهنه بندی حرکت شتاب زمین

جلوگیری بعمل آورد. بر همین اساس، در گزارش شماره ۵۶ سازمان زمین شناسی کشور، میزان بیشترین شتاب حرکت افق زمین با عمر مفید ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برای سازه‌های مختلف برآورد و پهنه بندی گردیده است. شکل ۳ پهنه‌بندی نواحی همشتاب در حوزه استخفاظی شهر پردیس را نشان می‌دهد. همچنانکه بر روی نقشه نیز مشاهده می‌شود نواحی شمالی شهر پردیس بر روی پهنه با شتاب بیشتر قرار دارد بطوریکه جهت ایجاد سازه‌های با طول عمر ۲۰ ساله حداکثر شتاب طراحی g ۰/۳۱ و ۱۰۰ ساله g ۰/۲۴ پیشنهاد می‌گردد.

در سرزمین‌های لرزه خیز مانند کوه‌های البرز و دامنه جنوبی آن در پیرامون تهران، برآورد بیشترین نیروهای افقی ناشی از لرزش‌های شدید زمین لرزه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این گونه تخمین‌ها باید آنقدر محتاطانه و متکی به واقعیات لرزه زمین ساختی و آمار گذشته در گستره باشد که پایداری ساختمان‌های مسکونی و سایر سازه‌های عمومی و مهم در ازای عمر مفید آنها و حفاظت جان ساکنین شهر را تأمین نماید. در عین حال همگراهای طرح مقاوم در برابر زمین لرزه باید چنان واقع بینانه انتخاب شود که از تحمیل هزینه‌های گزاف و نا لازم و در نتیجه غیراقتصادی نمودن بسیاری از طرح‌های عمرانی

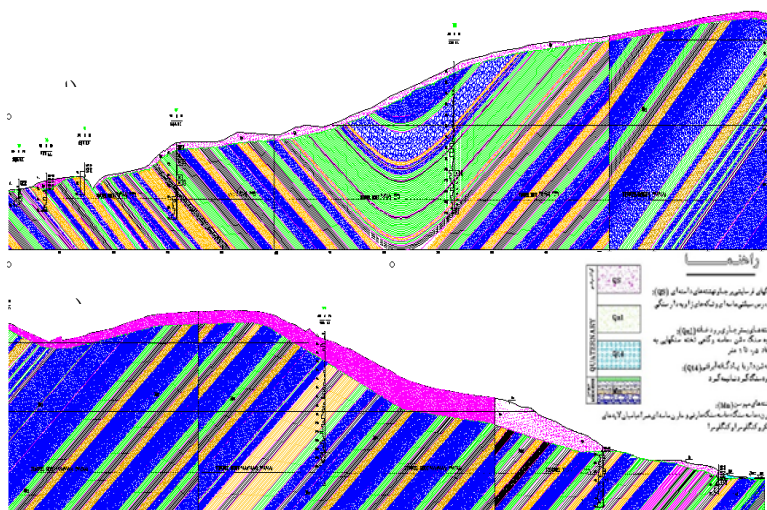


شکل ۳. پهنه بندی نواحی همشتاب در حوزه استخفاظی شهر پردیس

بررسی شرایط ساختاری توده‌سنگ‌های تشکیل دهنده تونل‌های پردیس

کم و بیش مشابه عضو توف میانی سازند کرج در برگرفته است. این رسوبات شامل توف‌های شیشه‌ای خیلی دانه ریز سبز رنگ نازک لایه متناوب با سنگ‌های سیلیسی سبز - خاکستری، توف‌های شیشه‌ای دانه درشت سبز رنگ و توف‌های آهکی به رنگ خاکستری روشن می‌باشند (ETK). شکل ۴ مقطع زمین شناسی تونل شهر جدید پردیس را نشان می‌دهد.

بخش توف‌های میانی سازند کرج که به ضخامت ۱۱۷۷ متر است، در پیرامون شهر پردیس رخنمون وسیعی دارد. اما محدوده داخل شهر پردیس بطور عمدۀ از رسوبات بخش توف‌های فوقانی سازند کرج پوشیده شده است. ضخامت توف‌های فوقانی در حدود ۹۱۷ متر و عمدتاً از نوع توف سبز است و در داخل آن لایه‌هایی از شیل توفی و ماسه سنگ توف‌دار و شیل آهکی دیده می‌شود. محل تونل‌های شهر جدید پردیس را نهشته‌های



شکل ۴. مقطع زمین‌شناسی تونل شهر جدید پردیس (الف). دهانه ورودی و (ب). دهانه خروجی

- سطح درزه‌ها از نظر زبری صاف بوده و اغلب دارای پرشدگی‌های نرم به ضخامت ۵ میلی‌متر هستند. توده‌سنگ از نظر هوازدگی در رده کم تا متوسط قرار می‌گیرد.

- شیب و جهت شیب درزه‌ها و لایه‌بندی مطابق جدول ۱ می‌باشد.

با توجه به برداشت‌های صورت گرفته و تحلیل آن در نرم افزار Dips ویژگی دسته درزه‌های موجود در مسیر تونل به شرح ذیل می‌باشد.

- بازشدگی درزه‌ها در قسمت‌های سطحی برابر یک تا ۵ میلی‌متر بوده ولی در قسمت‌های عمیق برابر ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۱. ناپیوستگی‌های ساختگاه تونل‌های دوقلوی شهر جدید پردیس

دسته درزه	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)
Bedding	۲۸	۳۵۵
J1	۱۲۰	۲۲۰

۲-۸- ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل

و وجود تناوب لایه‌های توف و مارن حفاری از دوسوی تونل تقریباً شرایط یکسانی دارد. ولی حفاری از محل خروجی به‌لحاظ زهکشی طبیعی تونل در صورت نشت یا نفوذ آب به داخل تونل نسبت به حفاری از سوی ورودی برتری دارد. در ادامه نحوه اجرای دهانه ورودی و خروجی به‌طور مختصر شرح داده شده است.

دهانه ورودی

۷۰ متر از ابتدای ورودی (شکل ۵) تونل‌های پردیس به دلیل هوازدگی شدید لایه‌های توف و کمی ارتفاع روباره به صورت ترانشه اجرا گردید که در نهایت به صورت گالری بتنی پوشانده می‌شود.

حفاری تونل‌های پردیس

حفاری تونل‌های دو قلوی پردیس در دو بخش دهانه‌های ورودی و خروجی انجام می‌شود. به‌لحاظ زمین‌شناسی مهندسی

جدول ۲. موقعیت و ویژگی‌های گمانه‌های حفارشده در مسیر تونل‌های شهر جدید پردیس

ردیف	گمانه	موقعیت گمانه	عمق گمانه (متر)	حفاری (متر)		آزمون‌های نفوذپذیری		آزمون‌های نفوذ استاندارد	
				آبرفت	سنگ	لوفران	لوژن	SPT	CPT
۱	B _۱	مسیر تونل	۳۰	۸/۲۵	۲۱/۷۵	۵	۵	۸	-
۲	B _۲	مسیر تونل	۳۵	۱۶	۱۹	۵	۴	۴	۴
۳	B _۳	مسیر تونل	۲۵	۶/۵	۱۸/۵	۲	۳	۲	۱
۴	B _۴	مسیر تونل	۷۰	۶	۷۴	۲	۱۰	۱	۲
۵	B _۵	مسیر تونل	۱۴۰	۱۰/۵۰	۱۲۹/۵	-	۸	-	-
۶	B _۶	مسیر تونل	۱۵۵/۵	۷	۱۴۸/۵	-	-	-	-
۷	B _۷	مسیر تونل	۱۷۵	۴۷	۱۲۸	-	۸	-	-
۸	B _۸	مسیر تونل	۷۰	۵/۲	۶۴/۸	۲	۱۳	۱	۲



شکل ۵. نمای از دهانه ورودی

دهانه خروجی

با توجه به هوازدگی شدید لایه های سنگی در دهانه خروجی و عدم امکان اجرای ترانشه به دلیل شیب بسیار تند زمین امکان ترانشه برداری و ساخت گالری میسر نگردیده و حفاری در ۵۰ متر ابتدایی از دهانه خروجی (شکل ۶) به صورت نیم مقطع و به صورت گام های نیم متری حفاری گردید.

۳-برنامه آزمایشگاهی

به منظور تعیین رفتار توده سنگ و خصوصیات مکانیکی آن لازم است آزمون هایی در مقیاس بزرگ انجام شود تا با اطمینان کافی بتوان به تحلیل پایداری سازه مورد نظر پرداخت. روشن است که نتایج آزمون های آزمایشگاهی نمی تواند معیار و مبنای طراحی قرار گیرند چرا که به ندرت اتفاق می افتد که رفتار توده سنگ حتی با تقریب زیاد، مشابه رفتار سنگ بکر باشد، اینجاست که نقش و جایگاه آزمون های برجا آشکار می گردد. به منظور طبقه بندی

توده سنگ های ساختگاه و برآورد پارامترهای ژئومکانیکی (فیزیکی و مکانیکی)، آزمون های آزمایشگاهی بر روی نمونه های اخذ شده از مغزه های حاصل از حفاری گمانه های اکتشافی به عمل آمد. این آزمون ها در تطابق با روش های پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM) و استاندارد آمریکایی برای مصالح و آزمون ها (ASTM) انجام شده است. آزمون های آزمایشگاهی بر روی نمونه های اخذ شده به شرح زیر انجام گردید. لازم به ذکر است، به دلیل انجام کم آزمون های آزمایشگاهی برای نمونه های سنگی محدوده تونل تنها مشخصات سنگ غالب دربرگیرنده تونل یعنی سنگ توف در ادامه آورده شده است.

۳-۱-تعیین ویژگی های فیزیکی

این سری از آزمون ها به منظور شناسایی مشخصات فیزیکی و تعیین ارتباط و همبستگی بین آنها بر روی نمونه های اخذ شده انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۶. شکل خروجی تونل پردیس به سمت فاز ۱۱

جدول ۳. نتایج آزمون های آزمایشگاهی جهت تعیین ویژگی های فیزیکی

نوع سنگ	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد تخلخل	درصد رطوبت
توف	۲	۲۴/۹	۱۴/۴

زهکش به طول حدود ۲ متر و قطر ۳۸ میلی‌متر در سقف و دیواره‌های تونل تعبیه شده است.

۳-۴- شاخص کیفی توده سنگ

برای ارزیابی کیفی توده سنگ هم‌زمان با عملیات حفاری گمانه‌ها، شاخص کیفی سنگ (RQD) محاسبه و ثبت گردید. برپایه نتایج بدست آمده از گمانه‌های اکتشافی توده سنگ‌های مسیر تونل‌ها از کیفیت متفاوتی برخوردار است که این تنوع ترکیب سنگ‌شناسی از علل عمده این امر است. در جدول ۵ متوسط تغییرات شاخص کیفی توده سنگ گمانه‌های اکتشافی مسیر تونل ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج مربوط به ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل پذیری

نوع سنگ	UCS(MPa)	E(GPa)	σ_t (MPa)	C (MPa)	$\phi(^{\circ})$	ν	m_i	GSI
توف	۳۴/۴۵	۸/۱۱	۰/۰۹۶	۰/۰۱۳	۳۱	۰/۱۶	۷	۳۵

جدول ۵. متوسط تغییرات شاخص کیفی توده سنگ گمانه‌های اکتشافی مسیر تونل

گمانه	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
متوسط شاخص کیفی توده سنگ	۹۹	۴۲	۵۳	۵۷	۴۷	۱۹	۴۰	۵۵	۳۷

۳-۵- روش المان مجزا و نرم افزار UDEC

ناپیوستگی‌های دیگر قابل بررسی است. روش اجزا مجزا تفاوت چندانی نسبت به سایر روش‌های عدی ندارد و تفاوت اساسی آن با سایر روش‌های عددی در این است که در این روش کل هندسه مدل و المان‌ها توسط فاصله و جهت ناپیوستگی‌ها تعیین می‌شود. (Fairhurst et al, 1990) فرمول‌سازی و توسعه روش اجزا مجزا نخستین بار توسط کندال و در سال ۱۹۷۱ آغاز شد و روند تکامل آن، طی چند دهه اخیر ادامه یافته است. نرم افزاری که بر مبنای این روش به تحلیل مسائل می‌پردازد، تحت عنوان UDEC شناخته شده است و در سال ۱۹۸۰ توسط کندال به ثبت رسیده است. توسعه بیشتر UDEC توسط کندال و هارت در سال ۱۹۸۵ انجام شد و لوموس در سال ۱۹۸۷ قابلیت‌های آنرا افزایش داد (Honjo et al, 1990)

۳-۲- تعیین ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل پذیری

سری دیگر از آزمون‌های آزمایشگاهی به منظور تعیین ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری نمونه‌های سنگ‌بکر مورد استفاده در طبقه‌بندی مهندسی و همچنین برآورد پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر و نهایتاً توده سنگ انجام می‌شود. نتایج آزمون‌های مقاومتی انجام شده جهت تعیین ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری در جدول ۴ ارائه شده است.

۳-۳- وضعیت آب زیرزمینی و رویکرد مقابله با آن

بر اساس مطالعات انجام شده تونل‌های پردیس بالای سطح آب زیرزمینی و حداکثر دبی آب ورودی به داخل فضای تونل در حدود ۱ لیتر در ثانیه ارزیابی شد. بدین منظور تعدادی گمانه

روش المان مجزا، روشی عددی است که معمولاً بمنظور آنالیز رفتار سیستم‌های ناپیوسته بکار می‌رود. مهمترین روش ناپیوسته است. این روش، بمنظور بررسی رفتار تغییر شکل پذیر منفصل در سنگ‌های درزه دار توسعه داده شده است. توانایی بی نظیر روش اجزا مجزا این است که توده سنگ بصورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا که بوسیله درزه‌ها تفکیک شده ان در نظر گرفته می‌شود و در این روش امکان ایجاد تغییر شکل نامحدود در امتداد درزه‌ها وجود دارد (Itasca Consulting Group, Inc). با توجه به ماهیت ناپیوسته محیط‌های سنگی، روش اجزا مجزا بطور روز افزونی بمنظور ارزیابی پایداری و بررسی تغییر شکل و شکست توده سنگ بکار برده می‌شود. در این روش توده سنگ به صورت یک محیط ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود و بنابراین تأثیر عوارض ساختاری نظیر درزه‌ها، گسل‌ها و انواع

۳-۵-۱- اصول روش مجزا

ثابت فرض نمود. هر چند که پس از انجام محاسبات چندین حلقه، در طول اجزای بلوک، می‌تواند اغتشاش‌هایی منتشر شود و آنچه را که از نظر فیزیکی امکان وقوع دارد شبیه‌سازی نماید- (Honjo et al, 1990). در این روش المان‌های بلوک سنگ بصورت متصل و یا در تأثیر متقابل با یکدیگر (بواسطه سطوح درزه‌ها) در نظر گرفته می‌شوند. رفتار غیر خطی و ناهمسانگرد توده سنگ می‌تواند مستقیماً و به آسانی بوسیله حرکت یا چرخش بلوک نشان داده شود. تماس گوشه‌ها و لبه‌های بین بلوک‌های سنگ با یکدیگر سبب افزایش جابجایی قائم (Δ_{un}) و جابجایی مماسی (Δ_{us}) می‌شود. اگر سختی نرمال (kn) و سختی برشی (ks) باشد. برای هر اتصال مشخص، افزایش جدید تنش نرمال ($\Delta\sigma_n$) و تنش برشی ($\Delta\sigma_s$) می‌تواند از رابطه ساده زیر بدست آید (Itasca Consulting Group, Inc). مطالعات فیرهارست در مورد مقایسه روش اجزا مجزا و روش اجزا محدود در آنالیز پایداری فضاهاى زیر زمینی در سنگ‌های درزه‌دار نشان می‌دهد که درجه تشابه بین این دو روش مستقیم با سختی نرمال و برشی درزه‌ها (kn و ks) دارد. هرچه سختی درزه‌ها کمتر باشد، تفاوت دو روش بیشتر می‌شود و سختی بالای درزه‌ها منجر به نتایج تقریباً مشابه در دو روش می‌شود (Itasca Consulting Group, Inc).

$$\Delta\sigma_n = kn \Delta_{un} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_s = ks \Delta_{us} \quad (2)$$

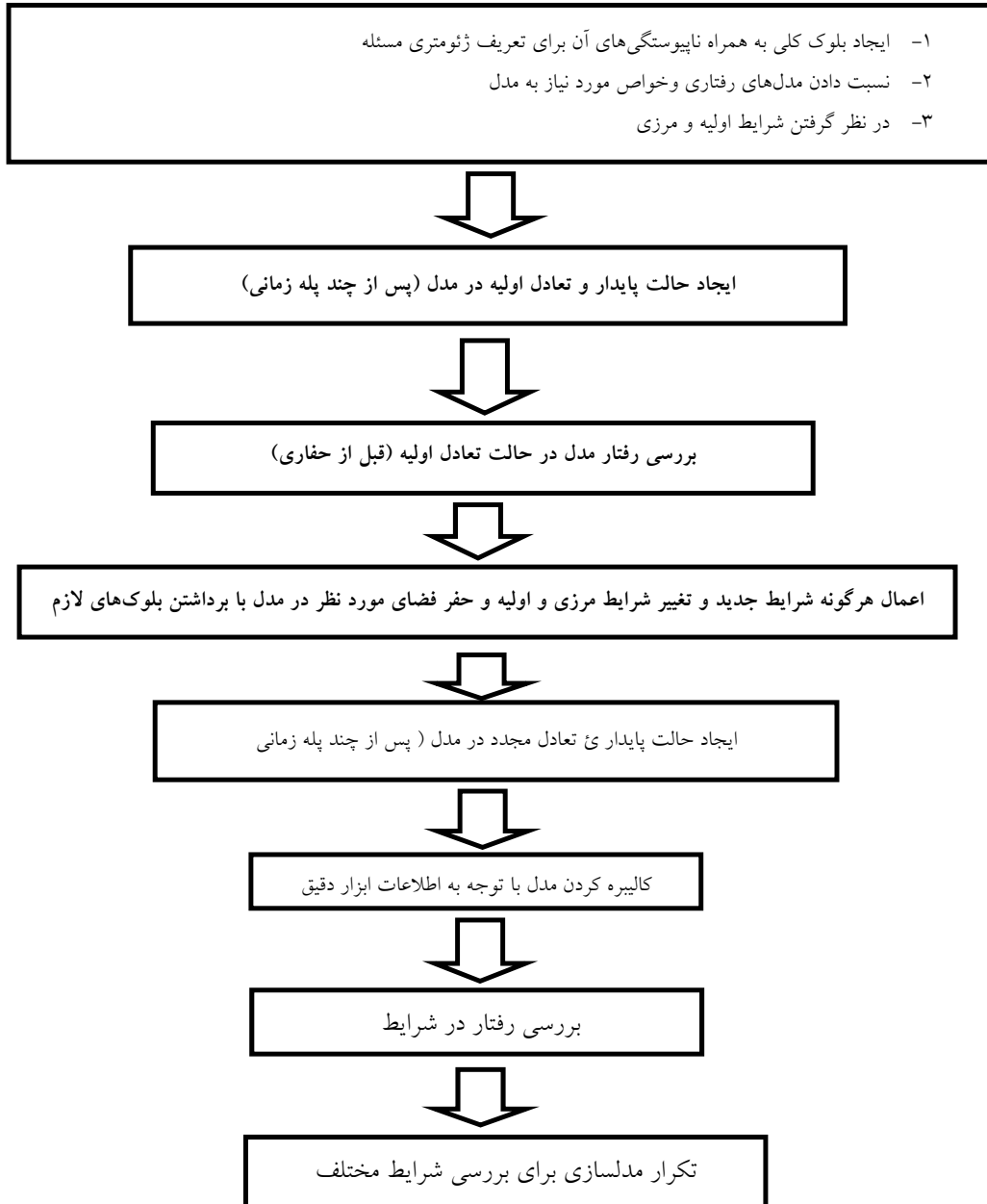
۳-۵-۲- مراحل مدل‌سازی در UDEC

در قدم اول مدل‌سازی، سه مرحله اساسی باید مورد توجه قرار گیرد. -تهیه بلوک کلی مدل و تعریف ژئومتری مسئله -نسبت دادن مدل‌های رفتاری و خواص مرتبط با آن به مواد مدل -اعمال شرایط مرزی و اولیه بعد از اتمام مراحل فوق‌الذکر رفتار مدل بررسی می‌شود. در این مرحله تعادل مدل قبل از انجام حفر فضای زیر زمینی بررسی می‌شود. در پایان این مرحله فضای زیر زمینی حفر می‌شود و سپس واکنش مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که

روش اجزا مجزا یک روش مدل سازی ناپیوسته به منظور شبیه سازی رفتار محیط سنگی درزه دار تحت شرایط استاتیک، شبه استاتیک و دینامیک می‌باشد. نکات برجسته و قابل توجه روش اجزا مجزا را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد. (Fairhurst et al, 1990) قابلیت شبیه سازی محیط ناپیوسته بصورت بلوکهای در کنار هم چیده شده که از طریق تماس‌ها با یکدیگر در هم کنش دارند. ناپیوستگی‌ها بعنوان مرز در هم کنش مابین بلوک‌ها تلقی می‌شوند که برای تعریف و نشان دادن رفتار آنها، مدل‌های رفتاری مربوط به ناپیوستگی‌ها وجود دارد. روش کار مطابق الگوریتم حل صریح وابسته به زمان می‌باشد. توده سنگ از بلوک‌هایی تشکیل می‌شود که می‌توانند نسبت به یکدیگر جابجایی و چرخشهای بزرگ انجام دهند. روش اجزا مجزا بر پایه فرآیند حل صریح بنا شده است که فرآیندی وابسته به زمان می‌باشد. روش حل صریح بر این حقیقت استوار است که در یک زمان محدود، اطلاعات مربوط به سیستم بلوک‌ها توسعه داده می‌شوند. زمان انجام محاسبات در هر حلقه محاسباتی، توسط یک پله زمانی تعریف می‌شود. نکته قابل توجه این است که هر پله زمانی باید به قدر کافی کوچک باشد به نحوی که انتقال اطلاعات از یک بلوک به بلوک‌های مجاور از نظر فیزیکی مقدور نباشد. به عبارت دیگر در طی محاسبات مربوط به یک پله زمانی شرایط باید به گونه‌ای باشد که بتوان سرعت موجود در بلوک را

خروجی نمایش داد. نتایج و خروجی‌هایی که بطور عمده مورد استفاده قرار می‌گیرند، به شرح ادامه می‌باشند.

- نمایش جابجایی‌ها، سرعت‌ها و تنش‌ها به صورت خطوط همتراز برای جهت‌های X و Y
 - نمایش جابجایی‌ها و سرعت‌ها به صورت برداری و تنش‌های اصلی
 - نمایش نمودارهای جابجایی، تنش، نیروهای نامتعادل و سرعت نسبت به زمان در هر نقطه دلخواه
 - نمایش ضرایب ایمنی به صورت خطوط همتراز
 - ارائه نتایج فوق برای تمام گره‌ها بلوک‌ها
- در شکل ۷ الگوریتم روش عمومی حل مسئله در تحلیل استاتیکی نشان داده شده است.



شکل ۷. الگوریتم عمومی حل مسائل استاتیکی در نرم افزار UDCE (Honjo et al, 1990)

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مراحل مدلسازی تونل پردیس

۴-۱-۱- انتخاب محدوده مناسبی از توده سنگ

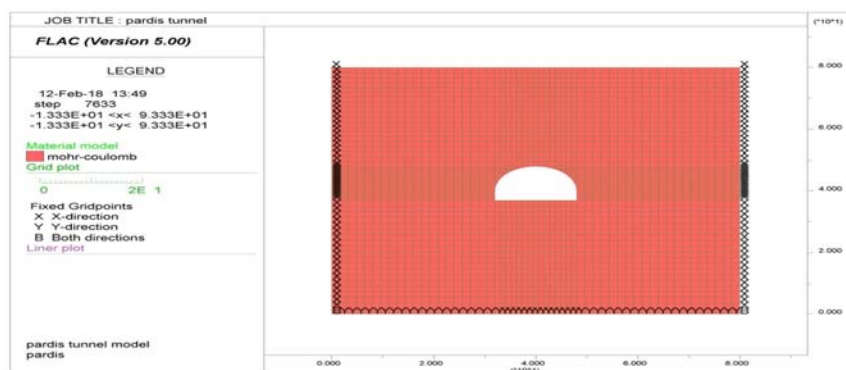
در اولین مرحله از مدلسازی باید شبکه‌ای مناسب برای مسئله تعریف شود و بدین ترتیب تعداد المان‌ها در مدل مشخص می‌شود. در این مرحله باید المان‌ها با ابعاد مناسب وارد شوند. در این مرحله اگرچه می‌توان با افزایش تعداد المان‌های شبکه نتایج دقیق‌تری را به دست آورد اما باید دقت داشت که با افزایش تعداد المان‌های شبکه، سرعت حل کندتر خواهد شد و با محدودیت حافظه در کامپیوتر مواجه خواهیم شد. لذا ایده اول در این زمینه مربوط به حل دقیق ریاضی در محیط‌های الاستیک (روابط کرش) می‌باشد که حداکثر زون تاثیر یک حفره زیرزمینی تا سه برابر قطر آن برآورد شده است. بدین ترتیب در صورتی که توده سنگ بصورت الاستیک رفتار نماید در فاصله سه برابر قطر، تنش‌ها به وضعیت اولیه خود می‌رسند. از طرف دیگر با توجه به نکته که اگر ابعاد مدل حدود ۱۰ برابر ابعاد حفره باشد، تحت شرایط مرزی متفاوت درصد خطاها به حداقل ممکن (حدود ۰/۵٪) کاهش خواهد یافت (Honjo et al, 1990). لذا برای اطمینان بیشتر به منظور کاهش خطا، ابعاد مدل برای تونلی به شکل نعل اسبی با شعاع ۸ متر، $8 \times 8 \times 8$ متر انتخاب شده است تا

بدین وسیله تاثیر شرایط مرزی به حداقل ممکن کاهش یابد. در شکل ۸ ابعاد و شرایط مرزی مدل ساخته شده نشان داده شده است.

۴-۱-۲- انتخاب مدل رفتاری مناسب و تعیین

پارامترهای آن

بسته به شرایط مسئله و نوع محیط مدل می‌توان از مدل‌های رفتاری مختلفی که در نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شده است، استفاده نمود. از میان مدل‌های رفتاری مختلفی که در این نرم‌افزار پیشنهاد می‌شوند، مدل رفتاری موهر-کلمب مدل مناسبی برای توده سنگ و خاک است. مدل رفتاری موهر-کلمب نمایانگر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می‌رسند و در مکانیک سنگ و خاک برای حالت پلاستیک، مدل مرسوم می‌است. لذا این مدل رفتاری در مدلسازی تونل پردیس استفاده شده است. با انتخاب هر کدام از مدل‌های رفتاری جهت استفاده در مسئله، پارامترهایی که لازمه بکارگیری آن مدل رفتاری است، باید مشخص شود. پارامترهای هر مدل با هر مدل دیگری متفاوت است.



شکل ۸ ابعاد و شرایط مرزی مدل عددی

آزمون‌های برجا یا آزمایشگاهی تعیین شود و اصولاً دقت نتایج حل یک مدل در دقیق بودن پارامترهای مختلف بدست آورده شده در منطقه است. لازم به ذکر است مدول حجمی (K) و مدول برشی (G) براساس روابط ۳ و ۴ برای توده سنگ محاسبه می‌شوند (فروغ، ۱۳۸۲).

مثلاً در مدل الاستیک احتیاج به سه پارامتر مدول حجمی، مدول بالک و دانسیته می‌باشد در صورتی که در مدل موهر-کلمب علاوه بر این سه پارامتر نیاز به تعیین سه پارامتر دیگر چون چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت کششی توده سنگ یا خاک می‌باشد. بنابراین باید قبل از مدلسازی هر کدام از پارامترهای مذکور، بسته به نوع منطقه، با انجام یک سری

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۳)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۴)$$

۴-۱-۳- اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه

در این مرحله باید شرایط مرزی و یا تنش‌های اولیه به مدل اعمال شود. معمولاً در شرایط مرزی تعیین وضعیت جابجایی‌ها و یا تنش‌ها در مرز مدل کار مشکلی است. لذا با توجه به اینکه مقدار دقیق تنش‌های برجا مشخص نیست، ثابت کردن مرز مدل به نحوی که جابجایی نقاط مرزی صفر باشد تنها راه اعمال شرایط مرزی واقعی است. بدین منظور جابجایی در جهت افقی نقاط انتهایی چپ و راست و همچنین جابجایی در جهت قائم نقاط کف مدل صفر شده‌اند. از طرفی به دلیل آنکه مقدار روبار تونل در مقطع مورد نظر حدود ۸۵ متر است، که با توجه به نظر کرش و مقطع حفاری کل آن مدل شده است، لذا مقادیر تنش قائم و تنش افقی در این مدل در نظر گرفته شده است.

۴-۱-۴- حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری

در این مرحله سعی می‌شود با الگو گرفتن از آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد شرایط مدل به واقعیت نزدیک‌تر شود. در حفر تونل واقعیت این است که قبل از حفر تونل، زمین در حال تعادل است و حفر تونل باعث به وجود آمدن یک سری اغتشاشات در وضعیت تنش‌ها و جابجایی‌ها خواهد شد. با توجه به اینکه تا این مرحله شرایط مرزی و تنش‌های برجا در مدل اعمال شده‌اند، لازم است مدل عددی قبل از حفر تونل حل شود تا تنش‌های اولیه ایجاد شوند. همچنین قبل از ایجاد هر نوع حفره، لازم است جابجایی‌ها صفر شوند تا شرایط مرزی واقعی قبل از حفر تونل منظور گردد. در این مرحله و قبل از حل مدل نقاط متناظر با بین‌های همگرایی سنجی برای مدل تعریف شده تا جابجایی‌های این نقاط در طی مراحل محاسباتی ثبت گردد.

۴-۱-۵- حفر تونل و حل مدل تا رسیدن به تعادل

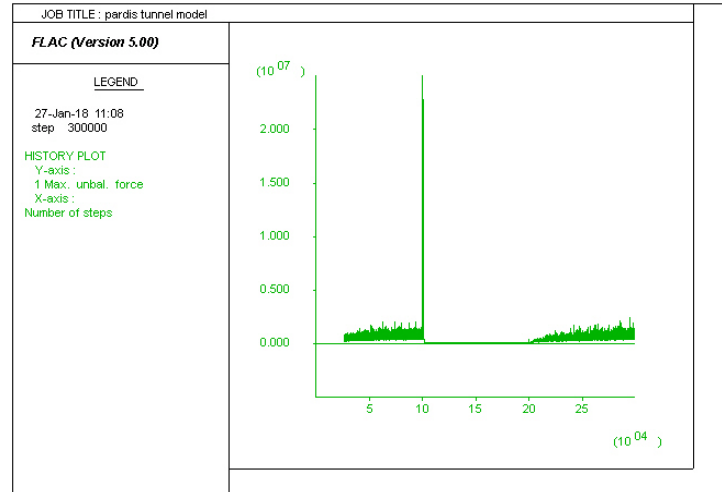
پس از واقعی ساختن شرایط تنش‌ها و صفر کردن جابجایی‌ها، تونل با هندسه مربوطه در مدل ایجاد می‌گردد. بسته به اینکه حل مدل با نصب سیستم نگهداری و یا بدون نصب سیستم نگهداری مدنظر باشد، شرایط متفاوت خواهد بود. بدین معنی، در حالتی که نصب سیستم نگهداری مدنظر نباشد، حل مدل تا رسیدن به تعادل کامل ادامه خواهد یافت. اما اگر نصب سیستم نگهداری مدنظر باشد باید سیستم نگهداری در یک فاصله زمانی پس از حفر صورت گیرد تا مدل‌سازی هرچه بیشتر با واقعیت تطبیق یابد. بدین ترتیب در این حالت مدل پس از حفر تا رسیدن به تعادل قبل از نصب سیستم نگهداری حل می‌شود. شکل ۹ تغییرات حداکثر بار نامتعادل، قبل و بعد از ایجاد تونل را قبل از نصب سیستم نگهداری نشان می‌دهد.

۴-۲-۴- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری با نرم

افزار flac

۴-۲-۱- نصب پوشش اولیه و ارزیابی پایداری

در این بخش با بررسی‌های به عمل آمده، تونل با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر لاینینگ پایدار است. اما تامین تنش فشاری، کششی و برشی سیستم نگهداری بایستی با توجه به نیروی محوری، ممان و نیروی برشی ایجاد شده در لاینینگ کنترل شود. در جدول ۶ پارامترهای مورد نیاز برای کنترل سیستم نگهداری آورده شده است.



شکل ۹. تغییرات حداکثر بار نامتعادل، قبل و بعد از ایجاد تونل قبل از نصب سیستم نگهداری

جدول ۶. پارامترهای مورد نیاز برای کنترل سیستم نگهداری

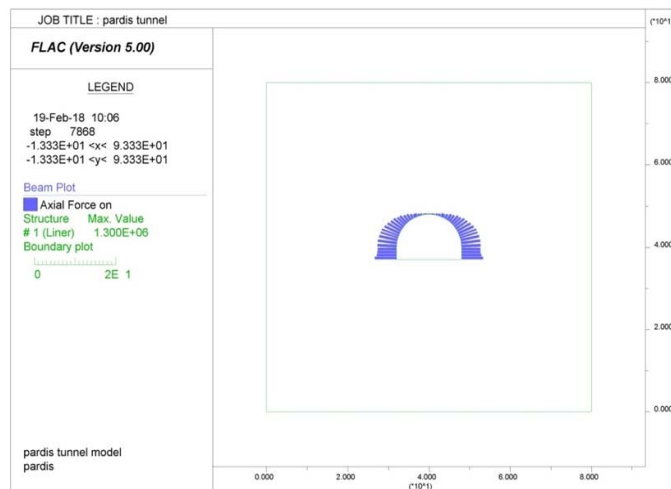
نیروی محوری لاینینگ (N)	ممان لاینینگ (N.m)	نیروی برشی لاینینگ (N)
$1/3 \times 10^6$	$1/841 \times 10^4$	$-2/511 \times 10^4$

در ادامه نیروی محوری، ممان و نیروی برشی ایجادشده در لاینینگ با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر به ترتیب در اشکال ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. در ادامه به کمک رابطه ۵ تنش فشاری و کششی و ۶ تنش برشی تعیین خواهند شد که نتایج آن در جدول ۷ آورده شده است.

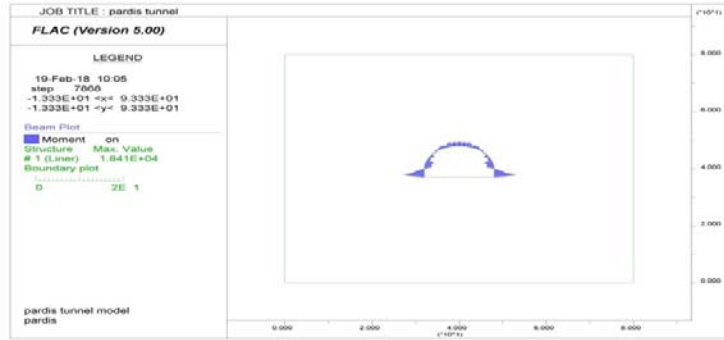
$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{MY}{I} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (6)$$

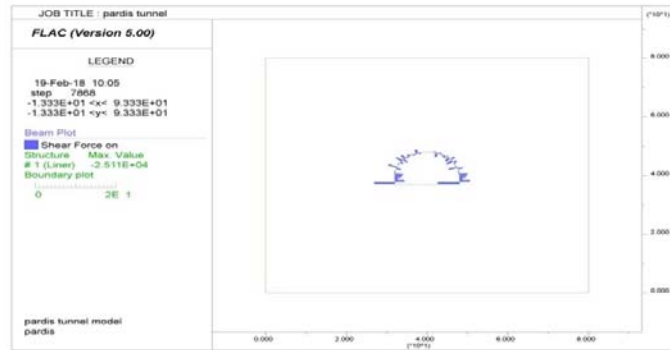
که در آن τ تنش برشی لاینینگ بر حسب مگاپاسکال، T نیروی برشی ایجاد شده در لاینینگ بر حسب مگا نیوتن و A سطح مقطع بر حسب مترمربع است. نتایج حاصل از کنترل سیستم نگهداری با روش **flac** در جدول ۷ ارائه شده است (Marangos, 1995).



شکل ۱۰. نیروی محوری ایجادشده در لاینینگ با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر



شکل ۱۱. ممان ایجادشده در لاینینگ با ضخامت ۵۰ سانتی متر



شکل ۱۲. نیروی برشی ایجادشده در لاینینگ با ضخامت ۵۰ سانتی متر

جدول ۷. نتایج حاصل از کنترل سیستم نگهداری با روش **flac**

تنش فشاری لاینینگ (مگا پاسکال)	تنش کششی لاینینگ (مگا پاسکال)	تنش برشی لاینینگ (مگا پاسکال)
۲/۱۵۸	۳/۰۴۱	۰/۰۵۰۲

با توجه به عدم تامین تنش کششی لاینینگ براساس نتایج حاصل از کنترل سیستم نگهداری، مطابق رابطه ۷، ضخامت براساس مجموعه لاینینگ، قاب مشبک ارائه شده است.

$$t_{eq} = t + \left(\frac{N\pi d^2}{\epsilon D} \times \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (7)$$

که در این رابطه، t_{eq} ضخامت لاینینگ معادل، t ضخامت لاینینگ، d قطر میلگرد و N تعداد میلگرد بکار رفته در قاب مشبک، D فاصله بین قاب‌ها همگی برحسب متر و E_s/E_c نسبت مدول یانگ فولاد به لاینینگ است که تقریباً برابر ۱۰ می‌باشد (Marangos, 1995).

۳-۴- تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری با نرم

افزار UDEC

با توجه به شرایط ساختاری توده سنگ در اطراف تونل پردیس و انطباق آن با اصول بکار رفته در نرم افزار UDEC مجدداً کلیه مراحل مدل سازی در نرم افزار UDEC نیز مد نظر قرار گرفته و با توجه به لزوم مشخص نمودن مشخصات ساختاری و مقاومتی دسته درزه‌ها براساس مدل موهر - کلمب تعیین می‌گردد.

۳-۴-۱- انتخاب مدل رفتاری مناسب و تعیین پارامترهای آن

بسته به شرایط مسئله و نوع محیط مدل می‌توان از مدل‌های رفتاری مختلفی که در نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شده است، استفاده نمود. از میان مدل‌های رفتاری مختلفی که در این نرم‌افزار پیشنهاد می‌شوند، مدل رفتاری موهر-کلمب مدل مناسبی برای توده‌سنگ و خاک است. مدل رفتاری موهر-کلمب نمایانگر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می‌رسند و در مکانیک‌سنگ و خاک برای حالت پلاستیک، مدل مرسوم است. لذا این مدل رفتاری در مدل‌سازی تونل پردیس استفاده شده است. با انتخاب هر کدام از مدل‌های رفتاری جهت استفاده در مسئله، پارامترهایی که لازم بکارگیری آن مدل رفتاری است، باید مشخص شود. پارامترهای هر مدل با هر مدل دیگری متفاوت است. شکل ۱۳ ابعاد و شرایط مرزی مدل عددی را نشان می‌دهد.

۳-۴-۲- اعمال شرایط مرزی و تنش‌های اولیه

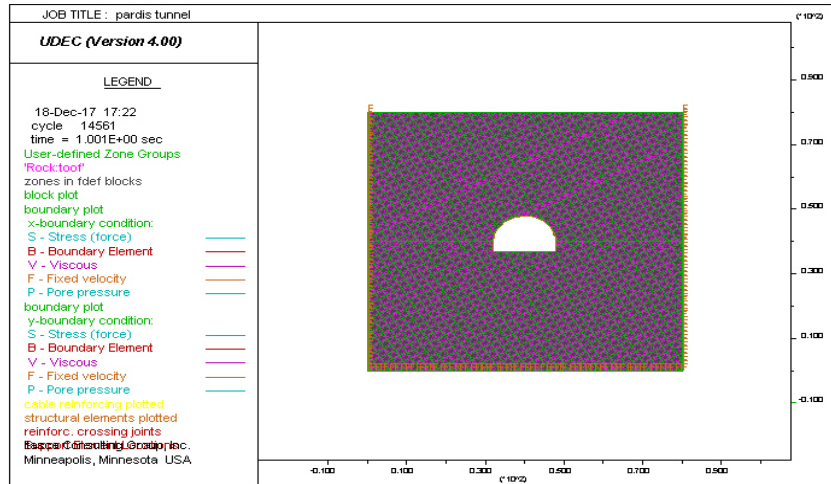
در این مرحله باید شرایط مرزی و یا تنش‌های اولیه به مدل اعمال شود. معمولاً در شرایط مرزی تعیین وضعیت جابجایی‌ها و یا تنش‌ها در مرز مدل کار مشکلی است. لذا با توجه به اینکه مقدار دقیق تنش‌های برجا مشخص نیست، ثابت کردن مرز مدل به نحوی که جابجایی نقاط مرزی صفر باشد تنها راه اعمال شرایط مرزی واقعی است. بدین منظور جابجایی در جهت افقی نقاط انتهایی چپ و راست و همچنین جابجایی در جهت قائم نقاط کف مدل صفر شده‌اند. از طرفی به دلیل آنکه مقدار روبار تونل در مقطع مورد نظر حدود ۸۵ متر است.

۳-۴-۳- حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری

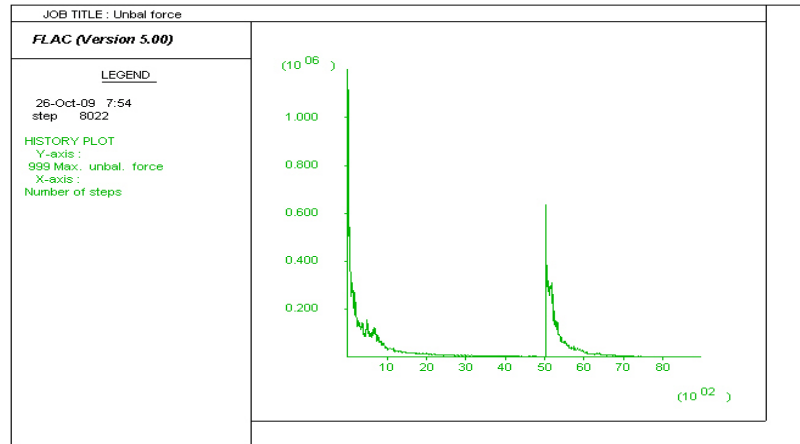
در این مرحله سعی می‌شود با الگو گرفتن از آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد شرایط مدل به واقعیت نزدیک‌تر شود. در حفر تونل واقعیت این است که قبل از حفر تونل، زمین در حال تعادل است و حفر تونل باعث به وجود آمدن یک سری اغتشاشات در وضعیت تنش‌ها و جابجایی‌ها خواهد شد. با توجه به اینکه تا این مرحله شرایط مرزی و تنش‌های برجا در مدل اعمال شده‌اند، لازم است مدل عددی قبل از حفر تونل حل شود تا تنش‌های اولیه ایجاد شوند. همچنین قبل از ایجاد هر نوع حفره، لازم است جابجایی‌ها صفر شوند تا شرایط مرزی واقعی قبل از حفر تونل منظور گردد. در این مرحله و قبل از حل مدل نقاط متناظر با بین‌های همگرایی‌سنجی برای مدل تعریف شده تا جابجایی‌های این نقاط در طی مراحل محاسباتی ثبت گردد.

۳-۴-۴- حفر تونل و حل مدل تا رسیدن به تعادل

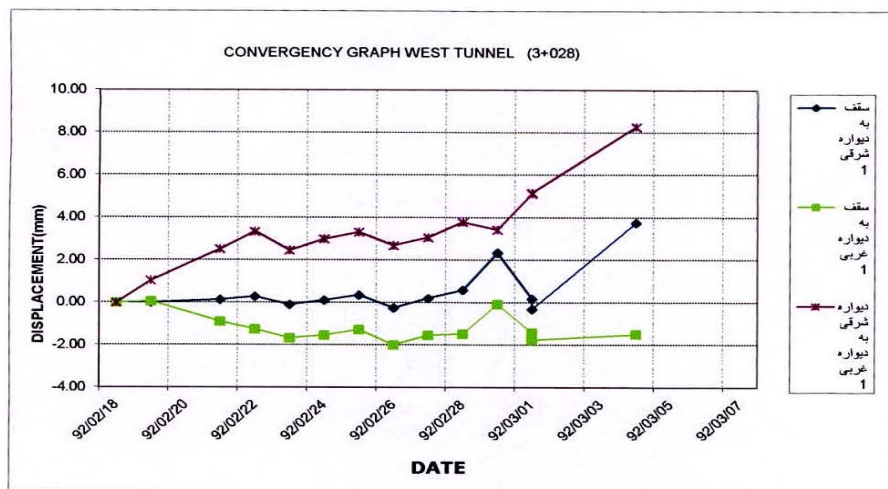
پس از واقعی ساختن شرایط تنش‌ها و صفر کردن جابجایی‌ها، تونل با هندسه مربوطه در مدل ایجاد می‌گردد. بسته به اینکه حل مدل با نصب سیستم نگهداری و یا بدون نصب سیستم نگهداری مدنظر باشد، شرایط متفاوت خواهد بود. بدین معنی، در حالتی که نصب سیستم نگهداری مدنظر نباشد، حل مدل تا رسیدن به تعادل کامل ادامه خواهد یافت. اما اگر نصب سیستم نگهداری مدنظر باشد باید سیستم نگهداری در یک فاصله زمانی پس از حفر صورت گیرد تا مدل‌سازی هرچه بیشتر با واقعیت تطبیق یابد. بدین ترتیب در این حالت مدل پس از حفر تا رسیدن به تعادل قبل از نصب سیستم نگهداری حل می‌شود. شکل ۱۴ تغییرات حداکثر بار نامتعادل، قبل و بعد از ایجاد تونل را قبل از نصب سیستم نگهداری نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. ابعاد و شرایط مرزی مدل عددی



شکل ۱۴. تغییرات حداکثر بار نامتعادل، قبل و بعد از ایجاد تونل قبل از نصب سیستم نگهداری



شکل ۱۵. نمودار همگرایی و همچنین نمودار میزان همگرایی

اغلب بدست آوردن مشخصات ژئوتکنیکی کامل زمین با اکتشافات ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی غیر ممکن است و تنها در هنگام حفر تونل است که می‌توان رفتار توده سنگ را به طور کامل ارزیابی کرد. کاربرد ابزارهای رفتار نگاری با افزایش دقت، قابلیت اعتماد و پایداری آنها گسترش یافته است. اعتبار و قابلیت اطمینان پیش‌گویی به طور کامل به درستی و دقت داده‌های ورودی در تحلیل بستگی دارد. در حیطه سازه‌های زیر زمینی، اندازه‌گیری‌های صورت گرفته بسته به خصوصیات مسأله، با هدف تعیین یکی از پارامترهای کرنش‌ها، جابه‌جایی نسبی، تنش در توده سنگ یا پوشش نگهداری، فشار تولید شده در قاب‌های فولادی، نیروی گسترش یافته در میل مهارها و فشار منفذی انجام می‌شوند. معمولاً تمایل زیادی برای تعیین جابه‌جایی‌ها (مثلاً همگرایی دیوارها) وجود دارد. زیرا از دید ریاضی پارامترهای جابجایی از عوامل محلی تاثیر کمتری می‌پذیرند. برای تعیین مقادیر معرف این پارامترها، ضروری است مقدار متوسط آنها را از روی مجموعه داده‌هایی که به اندازه کافی بزرگ هستند، تعیین کرد. به منظور غلبه بر این مشکل، اندازه‌گیری‌های میدانی در طول احداث سازه‌ها انجام می‌شود. این اندازه‌گیری‌ها نه فقط برای نشان دادن پایداری سازه‌ها، بلکه برای ارزیابی مجدد داده‌های ورودی پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی که در تحلیل و طراحی استفاده می‌شوند انجام می‌گیرد. به منظور بررسی پایداری و ارزیابی طراحی ساخت تونل‌های پردیس از روش تحلیل برگشتی استفاده شده است. برای استفاده از این روش از بین ایستگاههای همگرایی سنج نصب شده در داخل تونل مقطع مورد نظر انتخاب شد. برای ایستگاه همگرایی سنج با توجه به گمانه‌های اکتشافی و استفاده از نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی، در بازه $(\phi = 0/13, C = 8/11, E = 8/11)$ چندین مدل اولیه ساخته شده و جابجایی‌های بدست آمده هر یک از این مدل‌ها با میانگین جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های همگرایی مقایسه شده و خطای تک تک آنها محاسبه شده است. با استفاده از روش رگرسیون مدل‌های اولیه در چندین مرحله تصحیح و با کاهش خطای آنها مدل نهایی نتیجه شده است. در نهایت با تحلیل و بررسی مدل‌های نهایی، پارامترهای ژئومکانیکی تونل یعنی مدول الاستیسیته (E)، مقاومت چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) به عنوان جواب نهایی تحلیل برگشتی به دست آمده است. با مقایسه پارامترهای بدست آمده از تحلیل برگشتی و پارامترهای ژئومکانیکی استفاده شده در طراحی تونل، روش ساخت تونل و طرح اصلی آن بررسی و ارزیابی شده است. چنانچه از نمودار مربوطه مشاهده می‌شود، روند تغییرات همگرایی ثبت شده در هر سه جهت قطر شرقی در حدود ۸ میلی‌متر و قطر غربی ۴ میلی‌متر و در سقف ۱٫۸ میلی‌متر ثبت شده است. مقدار مقادیر همگرایی کاملاً از روند افزایشی برخوردار بوده است. نمودار همگرایی و همچنین نمودار میزان همگرایی در شکل ۱۵ ارائه شده است. در مرحله اول در بازه تعیین شده برای هر ایستگاه چند مدل عددی ساخته شده به طوری که مقادیر پارامترهای اولیه در محدوده فوق قرار گیرند. سپس خطای تک تک مدل‌ها با استفاده از رابطه (۹) مدل‌ها محاسبه می‌شود. این مقادیر همراه با خطای کل هر مدل در جدول ۸ ارائه شده است.

$$\text{Error} = \frac{uk - uk^*}{uk^*}$$

(۹)

جدول ۸ مدل سازی عددی و محاسبه میزان خطای هر مدل در مرحله اول

شماره مدل	E (Gpa)	C (Mpa)	ϕ ($^\circ$)	خطای کل (%)
1	8/11	0/013	31	0/29
2	8/12	0/014	32	-4/14
3	8/13	0/015	33	-3/71
4	8/14	0/016	34	-6/71
5	8/15	0/017	35	8/43
6	8/20	0/018	36	7/86
7	8/11	0/013	30	2/86
8	8/11	0/013	29	-3/71
9	8/11	0/013	28	4/43
10	8/12	0/014	27	7/86
11	8/12	0/014	31	5/29
12	8/12	0/014	30	5/14
13	8/10	0/012	31	7/86
14	8/10	0/012	32	8/71
15	8/10	0/012	32	5/00

در مرحله نهایی تمام مدل‌هایی که دارای خطای کمتر از ۵ درصد هستند در جدول شماره ۹ خلاصه می‌شوند. در نهایت با دقت به مدل‌های نهایی مشاهده می‌شود در جدول شماره ۸ و ۹ مدل شماره ۱ دارای کمترین خطا در مقایسه با مدل‌های نهایی دیگر هستند. بنابراین می‌توان پارامترهای حاصل از مدل یک را برای ایستگاه همگرایی سنجی به عنوان جواب نهایی تحلیل برگشتی به صورت جدول ۱۰ در نظر گرفت.

جدول ۹. مدل‌های عددی که خطای کمتر از ۵٪ دارند.

شماره مدل	E (Gpa)	C (Mpa)	ϕ (°)	خطای کل (%)
1	8/11	0/013	31	0/29
2	8/12	0/014	32	-4/14
3	8/13	0/015	33	-3/71
4	8/11	0/013	30	2/86
5	8/11	0/013	29	-3/71
6	8/11	0/013	28	4/43

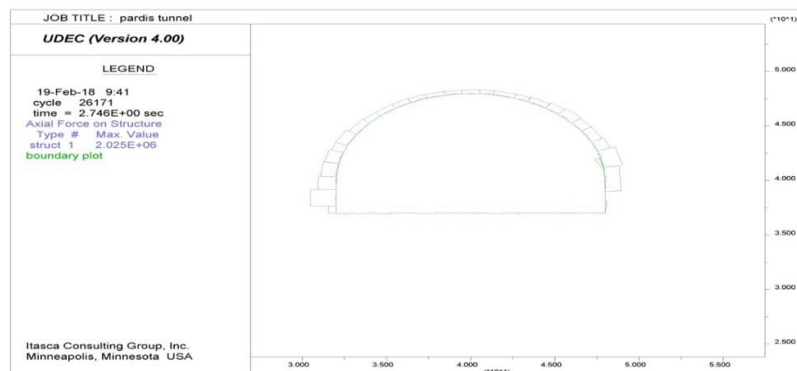
۴-۳-۵- نصب پوشش اولیه و ارزیابی پایداری

در این بخش با بررسی‌های به‌عمل آمده، تونل با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر لاینینگ پایدار است. اما تامین تنش فشاری، کششی و برشی سیستم نگهداری بایستی با توجه به نیروی محوری، ممان و نیروی برشی ایجاد شده در لاینینگ کنترل شود. در جدول ۱۱ پارامترهای مورد نیاز برای کنترل سیستم نگهداری آورده شده است. در ادامه نیروی محوری، ممان و نیروی برشی ایجاد شده در لاینینگ با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر به ترتیب در اشکال ۱۶، ۱۷ و ۱۸ ارائه شده است.

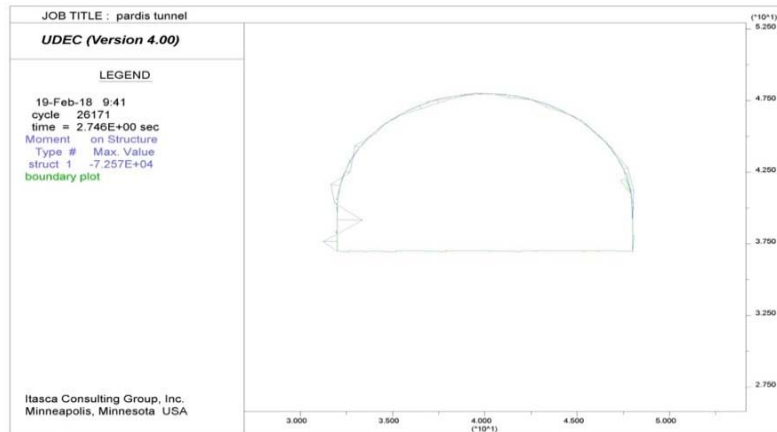
ردیف	پارامترهای ژئومکانیکی	مقدار
۱	E (Gpa)	8/11
۲	C (Mpa)	0/013
۳	ϕ (°)	31

جدول ۱۱. پارامترهای مورد نیاز برای کنترل سیستم نگهداری

نیروی محوری لاینینگ (N)	ممان لاینینگ (Nm)	نیروی برشی لاینینگ (N)
$۲/۰۲۵ \times ۱۰^۶$	$-۷/۲۵ \times ۱۰^۴$	$۷/۵۲۵ \times ۱۰^۴$



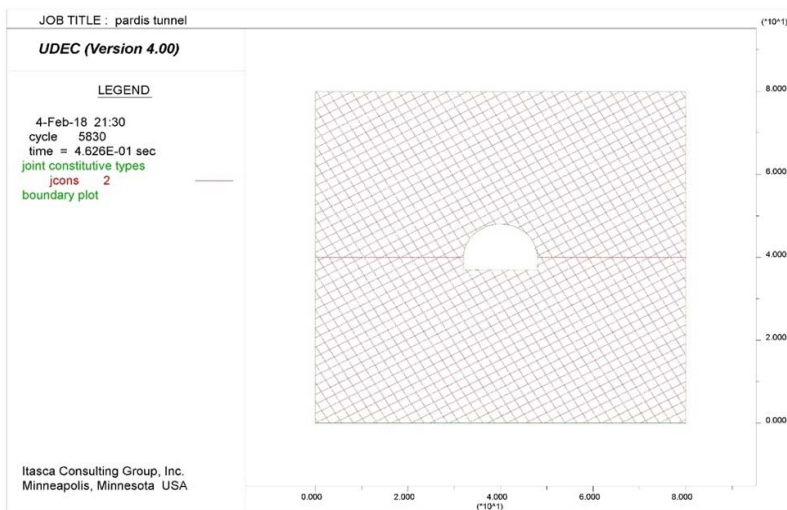
شکل ۱۶. نیروی محوری ایجاد شده در لاینینگ با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر



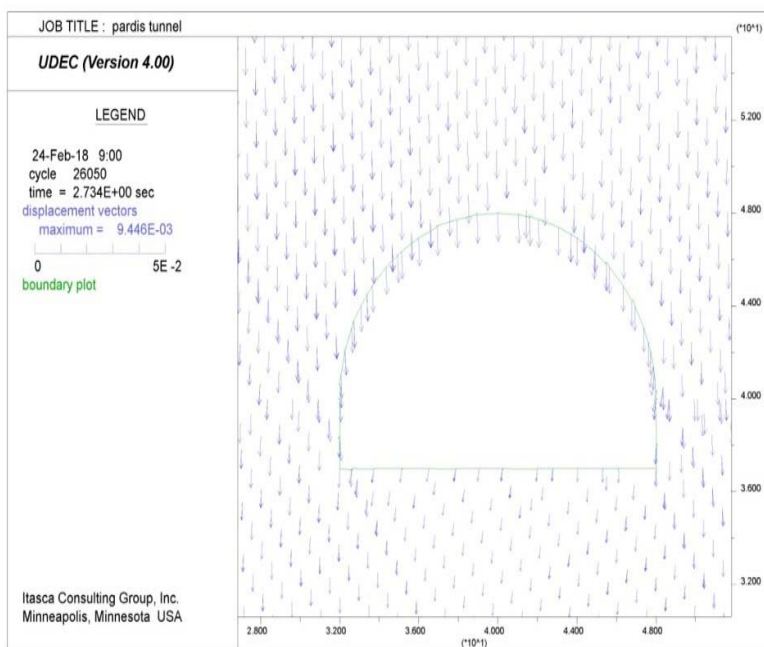
شکل ۱۷. ممان ایجادشده در لاینینگ با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر



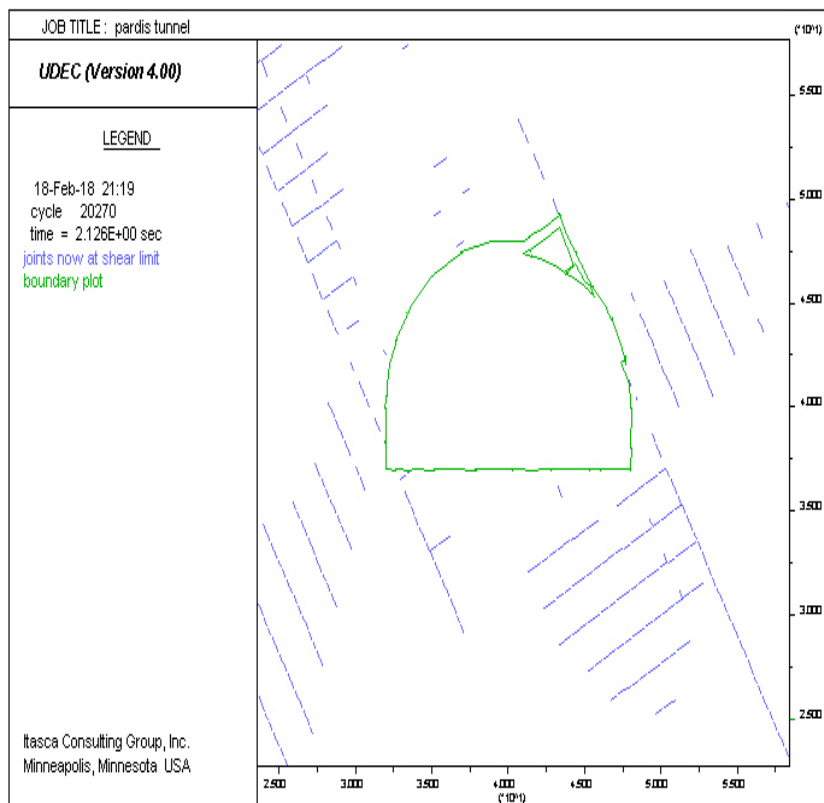
شکل ۱۸. نیروی برشی ایجادشده در لاینینگ با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر



شکل ۱۹. نمایش جهت، امتداد درزه‌ها و موقعیت آن نسبت به تونل



شکل ۲۰. نمایش بردارهای جابجایی به همراه حداکثر جابجایی صورت گرفته



شکل ۲۱. نمایش درزه‌هایی که تحت تاثیر جابجایی دچار لغزش شده‌اند.

همانطور که در شکل شماره ۱۹ مشاهده می شود بلوک‌های سمت بالا سمت چپ دچار لغزش شده و در هنگام حفاری نیاز به لغ گیری جدی دارند. با توجه به شکل شماره ۲۰ و درزه‌های دارای لغزش نمایش داده شده، نشان می‌دهد حرکت درزه‌ها به سمت راست و چپ باعث برداشته شدن نیروی فشاری بر روی بلوک بالا سمت چپ شده و حرکت آن به سمت تونل را توجیه می‌کند و با مقایسه درزه‌هایی که دچار لغزش شده‌اند مطابق شکل ۲۱ و ممان ایجاد شده در لاینینگ مطابق شکل شماره ۱۷ دقیقاً در محلی که درزه‌ها جایجا شده اند نیروی ممان افزایش یافته و حتی تغییر جهت داده است. در ادامه به کمک رابطه ۱۰ تنش فشاری و کششی و ۱۱ تنش برشی تعیین خواهند شد که نتایج آن در جدول ۱۲ آورده شده است.

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{MY}{I} \quad (10)$$

که در آن σ تنش کششی و مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال، P نیروی محوری ایجاد شده در لاینینگ بر حسب مگانیوتن، A سطح مقطع بر حسب مترمربع M ممان ایجاد شده در لاینینگ بر حسب مگانیوتن-متر، Y فاصله از تار خشی (نصف ضخامت لاینینگ) بر حسب متر و I ممان اینرسی بر حسب m^4 است (ماراگنوس، ۱۹۹۵).

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (11)$$

که در آن τ تنش برشی لاینینگ بر حسب مگاپاسکال، T نیروی برشی ایجاد شده در لاینینگ بر حسب مگانیوتن و A سطح مقطع بر حسب مترمربع است. نتایج حاصل از کنترل سیستم نگهداری با روش UDEC در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲. نتایج حاصل از کنترل سیستم نگهداری با روش UDEC

تنش فشاری لاینینگ (مگاپاسکال)	تنش کششی لاینینگ (مگاپاسکال)	تنش برشی لاینینگ (مگاپاسکال)
۵/۷۹	۲/۳۱	۰/۱۵

با توجه به عدم تامین تنش کششی لاینینگ براساس نتایج حاصل از کنترل سیستم نگهداری، مطابق رابطه (۱۲)، ضخامت براساس مجموعه لاینینگ، قاب مشبک در جدول ۱۲ ارائه شده است.

$$t_{eq} = t + \left(\frac{N\pi d^2}{\epsilon D} \times \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (12)$$

ضخامت لاینینگ با خصوصیات معمولی براساس رابطه (۱۲) اضافه شده است. همچنین شبکه‌های فولادی بخاطر تاثیر کم در جواب نهایی بدست آمده در ضخامت معادل در نظر گرفته نشدند. در قسمت ارائه نتایج به منظور تعیین سیستم نگهداری در روش UDEC نیز لاینینگ معادل به خاطر عدم تامین مقاومت لاینینگ در برابر کشش و شکست آن با توجه به نتایج بدست آمده بصورت مجموعه‌ای از لاینینگ، قاب مشبک و شبکه فولادی براساس رابطه (۱۲) پیشنهاد شد. همچنین مدلسازی به روش FLAC نیز در ادامه مدل UDEC و با اعمال سطح زلزله مورد

که در این رابطه، t_{eq} ضخامت لاینینگ معادل، t ضخامت لاینینگ، d قطر میلگرد و N تعداد میلگرد بکار رفته در قاب مشبک، D فاصله بین قاب‌ها همگی بر حسب متر و E_s/E_c نسبت مدول یانگ فولاد به لاینینگ است که تقریباً برابر ۱۰ می‌باشد.

برای مدلسازی سیستم نگهداری نصب شده در تونل پردیس، این سیستم بر اساس لاینینگ معادل مدل شده است. بدین صورت که ضخامت قاب مشبک به عنوان ضخامت معادل به

نظر حل شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که نیروی محوری و برشی در حالت *FLAC* از *UDEC* کمتر است، ولی این مقدار در ممان ایجاد در لاینینگ بر عکس است. مقایسه نتایج در دو حالت در جدول ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است.

جدول ۱۳. مقایسه نتایج نیروهای محوری، برشی و ممان ایجاد شده در لاینینگ در دو حالت *FLAC* و *UDEC*

نیروی محوری لاینینگ (<i>N</i>)	ممان لاینینگ (<i>Nm</i>)	نیروی برشی لاینینگ (<i>N</i>)	نوع مدل سازی
$2/0.25 \times 10^6$	$-7/25 \times 10^4$	$7/525 \times 10^4$	<i>UDEC</i>
$1/3 \times 10^6$	$1/841 \times 10^4$	$-2/511 \times 10^4$	<i>FLAC</i>

جدول ۱۴. مقایسه نتایج تنش‌های کششی، برشی و ممان ایجاد شده در لاینینگ در دو حالت *FLAC* و *UDEC*

تنش کششی لاینینگ (مگاپاسکال)	تنش برشی لاینینگ (مگاپاسکال)	تنش فشاری لاینینگ (مگاپاسکال)	نوع مدل سازی
۲/۳۱	۰/۱۵	۵/۷۹	<i>UDEC</i>
۳/۰۱۴	۰/۰۵۲	۲/۱۵۸	<i>FLAC</i>

۵- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش، کاربرد روش‌های عددی مختلف جهت بررسی و تحلیل پایداری تونل‌های پردیس در سازند کرج با استفاده از روش‌های عددی تفاضل محدود در محیط پیوسته (نرم افزار *FLAC*) و المان مجزا در محیط ناپیوسته (نرم افزار *UDEC*) می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا تحلیل پایداری تونل‌های پردیس انجام و با اعمال یک سیستم نگهداری بهینه با استفاده از روش‌های مختلف عددی مدل سازی شدند. در نهایت نتایج حاصل از روش‌های مختلف، با نتایج ابزار دقیق مقایسه شدند. در این پژوهش، جهت مدل‌سازی سیستم نگهداری نصب شده در تونل پردیس، این سیستم بر اساس لاینینگ معادل مدل شده است. بدین صورت که ضخامت قاب‌مشبک به‌عنوان ضخامت معادل به ضخامت لاینینگ با خصوصیات معمولی اضافه شده است. همچنین شبکه‌های فولادی بخاطر تاثیر کم در جواب نهایی بدست آمده در ضخامت معادل در نظر گرفته نشدند.

روش *FLAC* نیز در ادامه مدل *UDEC* و با اعمال سطح زلزله مورد نظر حل شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که نیروی محوری و برشی در حالت *FLAC* از *UDEC* کمتر است، ولی این مقدار در ممان ایجاد در لاینینگ بر عکس است. در مدل‌سازی تونل‌های پردیس با توجه به جابجایی بلوک‌ها به داخل تونل می‌توان گفت که محیط دارای یک رفتار ناپیوسته است. به عبارت دیگر با توجه به این که با جابجایی کمتر در نرم افزار تفاضل محدود ممان بیشتر از نرم افزار المان مجزا منتج شده، سیستم درزه موجود می‌تواند کنترل کننده رفتار کل توده سنگ در محدوده اختشاش باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از مدل سازی‌های عددی، مهمترین عامل ناپایداری تونل‌های پردیس، وجود لایه بندی‌های تکنونیزه شده و حرکت بلوک‌های سنگی موجود در این محدوده است.

با توجه به نتایج بدست آمده بصورت مجموعه‌ای از لاینینگ، قاب‌مشبک و شبکه فولادی پیشنهاد شد. همچنین مدل‌سازی به

۶-مراجع

- Honjo. Y. Tsung. L. W, Sukajo. S. (1994). Application of Akaike Information Criterion Statistics to Geotechnical Inverse Analysis: the Extended Bayesian Method. *Structural Safty*, Vol. 14, 5-29.
- Jing. L. (2003). A Review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modeling for Rock Mechanics and Rock Engineering. *Division of Engineering Geology*, Royal Institute of technology, Stockholm 44, Sweden.
- Kirsten, G., (1898). Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre. *veit.deit.ing.* 42(28), 797-807.
- Marangos, Ch, N., (1995). Stability analysis of construction in jointed rock mass. *Mechanics of jointed and faulted rock*, *Balkema/Rotterdam*, 823-829.
- Shen. B., Barton. N., (1997). The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, Vol.34, No.1, 117-125.
- Shi G.H.and Goodman, R.E. (1989).The key blocks of unrolled joint traces in developed maps of tunnel walls. *int. j. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*13, 131-158.
- دهقان بنادکی، محمد مهدی (۱۳۷۹). همگرایی و کنترل آن در تونل‌ها. *انتشارات دانشگاه شاهرود*، ۷۰-۹۰.
- شرکت مهندسی مشاور کاوش راه (۱۳۸۹). گزارش معرفی، مطالعات صورت گرفته، مشخصات اجرایی تونل شهر جدید پردیس.
- فروغ، امید، (۱۳۸۲). بررسی تاثیر پارامترهای زمین شناسی و ژئوتکنیکی بر راندمان رودهدر. *ششمین کنفرانس تونل ایران*.
- Brown, E.T. and Fergusen, G.A. (1979). Progressive hanging wall caving at gath mine, *Rhodesia. Trans. Instn min metal.*88, A92-105.
- Carranza-Torres. C. 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*, Vol.15, No. 2, 187-213.
- Cheng, M.Y., (1998). Advancements and improvement in Discontinuous Deformation Analysis. *Computers and Geotechnics*, Vol.22, No.2, 153-163.
- Fairhurst. C., PEI. J., (1990). A Comparison between the distinct element method and the finite method for analysis of the stability of an excavation in jointed rock. *Tunneling & Underground Space Technology*.Vol.5.No.1.2. 111-117.
- Hoek. E., (2000). *Rock Engineering. Balkema/Rotterdam.*

Analysis of Stability and Determination of Tunnel Maintenance System by Discrete Element Method and Comparison of Its Case Results with Finite Difference Method (Case Study: Pardis Tunnel)

*Rohollah Sarem, Department of Civil Engineering,
Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.*

*Mohsen Amouzadeh Omrani, Department of Civil Engineering,
Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.*

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

E-mail: Mo.Omrani@iau.ac.ir

Received: August 2024- Accepted: December 2024

ABSTRACT

In recent years, the need for an accurate identification of the conditions of the earth has become apparent, in response to the growing need for larger and more deep underground spaces. Underground engineering geological surveys are conducted using explorations and geophysics, office studies and laboratory tests. In this regard, underground excavations can be classified into three groups of tunnels, caverns and mines. The new township tunnels of the Pardis are part of the Phase 5, 8.9, and 11 new Pardis projects, which aim at providing access to these phases independently to the highway and the large Pardis of Tehran, and the arterial axis of the first phase of the 3.2 phase 1 and 4 new Pardis cities. Considering the geologic nature of the tunnels in the new Pardis, the layers of the new Pardis are affected by the tectonic factors and, on the other hand, the results of the convergence and also the disruptions have not been consistent with the earlier studies, and most of the falls are wedge-shaped Either due to the expansion of the previous wedge slabs, so with all the evidence, the possibility of a discontinuous environment was highly probable. The purpose of this research is to use different numerical methods for studying and analyzing the stability of Pardis tunnels in Karaj Formation using numerical methods of finite difference in continuous environment (FLAC software) and separate element in the discontinuous environment (UDEC software). In this research, the sustainability analysis of the tunnels of the Pardis was first performed and optimized by applying a variety of numerical methods. Finally, the results of different methods were compared with the results of the instrumentation. The results show that the model made by UDEC software is closer to real Earth conditions compared to the FLAC software. According to the results obtained from the comparison of the amount of displacement occurring around the drilled space, this environment has a discontinuous behavior.

Keywords: Stability Analysis, Pardis Tunnel, Finite Difference, Discrete Element, FLAC, UDEC