دوره ۱۴، شماره ۳۸، بهار ۱۴۰۳، صفحه ۲۱-۳۳

نشریه روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: http://anm.yazd.ac.ir/

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی عددی سه‌بعدی سامانه پیش نگهداری در جلوی سینه‌کار تونل با رویکردهای مختلف، مطالعه موردی

سعید صبور[۱]، مرتضی جوادی اصطهباناتی*[۱]، شکرالله زارع[۱]

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت: بهمن ۱۴۰۱، پذیرش: آبان ۱۴۰۲)

چکیده

مدل‌سازی سامانه‌های پیش نگهداری به‌عنوان یکی از چالش‌های طراحی و بازطراحی تونل‌ها محسوب می‌شود. به‌طورکلی، سامانه‌های پیش نگهداری تونل با استفاده از دو دیدگاه مختلف شامل رویکرد مبتنی بر المان‌های سازه‌ای خطی و رویکرد مبتنی بر زون معادل مدل‌سازی می‌شوند. هدف از این مقاله، بررسی تأثیر رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری در مدل‌سازی عددی اندرکنش تونل و زمین درون‌گیر است. بدین منظور، یکی از مجموعه تونل‌های پروژه آزادراه تهران شمال به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب‌شده و مدل‌سازی عددی اندرکنش تونل و زمین درون‌گیر با رویکردهای مختلف و با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام‌شده است. به‌منظور اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی مدل عددی، بخشی از نتایج مدل عددی و یکی از ریزش‌های حادث‌شده در حین عملیات حفاری تونل مورد مقایسه قرار گرفت. درنهایت، مقایسه بین نتایج مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری با رویکردهای مختلف انجام شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که مدل عددی مورداستفاده بخش مهمی از شواهد و رخدادهای حادث‌شده در واقعیت را به‌طور مناسبی ارزیابی نموده و از این نظر، استفاده از این مدل عددی برای سایر اهداف عملی به‌ویژه تحلیل پارامتریک با دقت موردنیاز امکان‌پذیر خواهد بود. جابجایی‌های قائم پیش‌بینی‌شده مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف هم ازنظر توزیع فضایی و مقادیر جابجایی دارای شباهت‌های بسیار زیادی بوده و میزان خطای نسبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده جابجایی تاج تونل با روش‌های مختلف به‌طور متوسط برای مجموعه تونل‌های موردبررسی در حدود ۲/۷ درصد و ۵/۱ درصد است. همچنین، با توجه به اختلاف نسبتاً اندک‌بین نتایج حاصل از مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری به‌صورت المان سازه‌ای و مدل‌های مبتنی بر زون معادل، استفاده از هر یک از این دیدگاه‌ها برای مقاصد مدل‌سازی امکان‌پذیر خواهد بود.

کلمات کلیدی

پیش نگهداری، مدل‌سازی عددی، المان سازه‌ای خطی، زون معادل، تونل

*عهده‌دار مکاتبات: m.javadi@shahroodut.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2023.19518.1587

۱- مقدمه

امروزه بخش قابل‌توجهی از شبکه راه‌های کشور از مناطق کوهستانی عبور می‌کند که در طول مسیر احداث تونل‌ها، شرایط متنوعی از توده سنگ و زمین درون‌گیر وجود خواهد داشت. احداث تونل در زمین‌های ضعیف مستلزم به‌کارگیری انواع مختلفی از روش‌های بهسازی و کاهش مخاطرات حین حفاری است. در طول سالیان اخیر، روش‌های مختلفی برای کاهش این مخاطرات توسعه‌یافته که یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین این روش‌ها برای زمین‌های ضعیف، اجرای پیش نگهداری مبتنی بر سامانه چتری در جلوی سینه‌کار تونل است. با توجه به کاربرد روزافزون سامانه چتری در صنعت تونل سازی، لازم است مدل‌های کارآمد برای مطالعه و طراحی این سامانه توسعه یابد.

در تونل سازی در شرایط زمین‌شناسی نامساعد، انواع مختلفی از روش‌های پیش نگهداری برای کنترل پایداری محدوده سینه کار بکار گرفته می‌شود. روش‌های پیش نگهداری را می‌توان ازنقطه‌نظر روش اجرایی و اقدامات کنترلی به روش‌های مختلفی ازجمله میله‌گذاری، روش چتری، لوله رانی، تزریق با فشار زیاد و انجماد تقسیم‌بندی نمود که امروزه، روش چتری به‌طور گسترده‌ای در پروژه‌های تونل سازی مورداستفاده قرار می‌گیرد [۱]. روش چتری در مقایسه با سایر روش‌های پیش نگهداری دارای مزایای بیشتری ازجمله افزایش پایداری سینه‌کار، کاهش ابعاد و ظرفیت تحکیمت موردنیاز (قاب فولادی، شاتکریت و...)، کاهش جابجایی در سینه‌کار، امکان افزایش عرض حفاری، سهولت اجرا و کاهش هزینه‌های اجرایی بوده [۲] که این مزایا باعث گسترش روزافزون استفاده از این روش شده است. گستردگی کاربرد روش چتری در صنعت تونل سازی باعث شده است که نقش مطالعات طراحی و مدل‌سازی این روش بیش‌ازپیش آشکار گردد.

به‌طورکلی، روش‌های طراحی سامانه پیش نگهداری چتری را می‌توان به چهار دسته ۱- توصیه‌های مندرج در دستورالعمل‌ها و استانداردهای طراحی، ۲- روش‌های تجربی، ۳- روش‌های تحلیلی و ۴- روش‌های عددی تقسیم‌بندی نمود. دستورالعمل‌ها و استانداردهای طراحی تونل (به‌طور خاص منوال فدرال آمریکا [۳] و استاندارد ژاپن [۴]) تنها به انتخاب برخی از مشخصات سامانه پیش تحکیم (عمدتاً فاصله‌داری لوله‌ها و زاویه نصب) محدود می‌شوند و نقش شرایط زمین، وضعیت توده سنگ درون‌گیر تونل و ابعاد فضای زیرزمینی نادیده گرفته می‌شود. برخی از این محدودیت‌ها در روش‌های تجربی مبتنی بر نمودار رفتار تونل [۵] مرتفع شده است. بااین‌وجود، نسخه فعلی روش تجربی انتخاب سامانه چتری پاسخ مناسبی از نحوه عملکرد و ظرفیت این سامانه‌ها ارائه نمی‌کند [۶]. برای رفع این محدودیت‌ها، روش‌های تحلیلی برای محاسبه ظرفیت سامانه چتری و کمی سازی محاسبات طراحی تحلیلی توسعه داده‌شده‌اند. به‌طورکلی، روش‌های تحلیلی به دو دسته روش‌های مبتنی بر تئوری تیر یک سر گیردار [۷-۹] و تیر دو سر گیردار [۱۰-۱۲] تقسیم‌بندی می‌شوند. نکته کلیدی در کارایی روش‌های تحلیلی، انتخاب صحیح نوع تئوری (تیر یک سر گیردار یا تیر دو سر گیردار) و همچنین انتخاب صحیح بار وارده از طرف زمین به سامانه چتری است. در عمده موارد، تعیین بار وارده به سامانه چتری نیز با عدم قطعیت‌های بسیار زیادی همراه بوده و مقادیر پیش‌فرض مورداستفاده در روش‌های تحلیلی عمدتاً موردتردید است. برای رفع این محدودیت‌ها، روش‌های عددی به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی اندرکنش سامانه‌های پیش نگهداری در مطالعات بکار گرفته‌شده است. در حقیقت، عمده پارامترهای مؤثر بر رفتار اندرکنشی سامانه‌های پیش نگهداری چتری شامل طول لوله‌ها، طول همپوشانی، فاصله مرکز تا مرکز، ضخامت لوله‌ها، قطر خارجی، زاویه نصب در اطراف تونل، زاویه نصب نسبت به محور تونل و طول منطقه نگهداری نشده [۱۳] در روش‌های عددی قابل‌اعمال خواهد بود.

در مطالعات پیشین، مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری چتری در روش‌های عددی با دو دیدگاه کاملاً متفاوت شامل ۱-مدل‌سازی المان‌های سازه‌ای خطی و ۲-زون معادل با المان‌های سطحی یا حجمی در مرز تونل انجام‌شده است. در دیدگاه اول، مطالعات متعددی انجام‌شده که در این مطالعات، سامانه پیش نگهداری چتری به‌صورت مستقیم و با استفاده از المان سازه‌ای نظیر beam، pile و cable در جلو و اطراف سینه‌کار مدل‌سازی شده است [۱۴-۱۸]. در دیدگاه دوم، سامانه پیش نگهداری چتری به‌صورت یک زون با مشخصات و خواص معادل در اطراف دیواره تونل در نظر گرفته می‌شود [۱۹-۲۳]. روش زون معادل به‌عنوان یک راه‌حل ابتکاری توسط هوک (۲۰۰۴) معرفی‌شده و ویژگی‌های زون معادل (پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری) با استفاده از

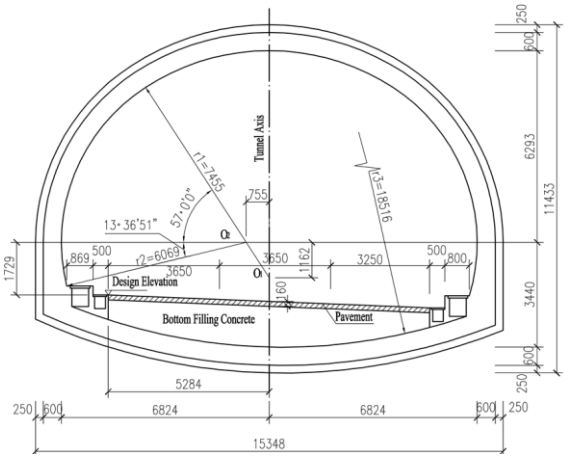
میانگین‌گیری سطحی اجزای سامانه پیش نگهداری و زمین درون‌گیر تونل محاسبه می‌شود. به‌عنوان‌مثال، مقاومت فشاری تک‌محوری را می‌توان با ضرب مقاومت هر المان در سطح مقطع هر المان و سپس محاسبه مجموع این مقادیر برای کل مساحت تعیین نمود [۲۳]. هر دو رویکرد مورداستفاده برای مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری، دارای معایب و یا مزایای متفاوتی بوده که می‌توان به فاکتورهایی از قبیل سادگی مدل‌سازی، کارایی المان‌ها، توزیع بارهای وارده، امکان به‌کارگیری در مدل‌های دوبعدی و همچنین تعداد پارامترهای موردنیاز برای مدل‌سازی اشاره نمود [۲۴]. بااین‌وجود، در مطالعات پیشین، تنها یکی از دو رویکرد مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری مورداستفاده قرار گرفته و در هیچ‌یک از مطالعات پیشین به‌طور هم‌زمان هر دو رویکرد و یا مقایسه نتایج دو رویکرد مختلف مدل‌سازی موردبررسی قرار نگرفته است. در حقیقت، تفاوت بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی سامانه پیش نگهداری چتری با استفاده از المان‌های سازه‌ای و روش زون معادل در هیچ‌یک از مطالعات پیشین به‌طور صریح موردبررسی قرار نگرفته که این موضوع، به‌عنوان هدف اصلی مقاله پیش رو موردمطالعه قرارگرفته است.

هدف از این مقاله بررسی تأثیر نوع روش مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری چتری بر روی نتایج مدل‌های عددی است. بدین منظور، یکی از تونل‌های خاص آزادراه تهران شمال به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب‌شده و مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری چتری برای این تونل با دو روش المان‌های سازه‌ای و المان محیط معادل در نرم‌افزار FLAC3D انجام‌شده است. نتایج حاصل از این دو رویکرد مدل‌سازی در قالب جابجایی‌های ناشی از حفر تونل موردبررسی قرارگرفته است. همچنین، کارایی و اعتبارسنجی مدل عددی در پیش‌بینی ریزش حادث‌شده در محدوده فاقد سامانه پیش نگهداری چتری نیز برای مدل عددی سه‌بعدی موردبررسی قرارگرفته است. درنهایت، نتایج حاصل از دو رویکرد مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری چتری موردبررسی قرارگرفته است.

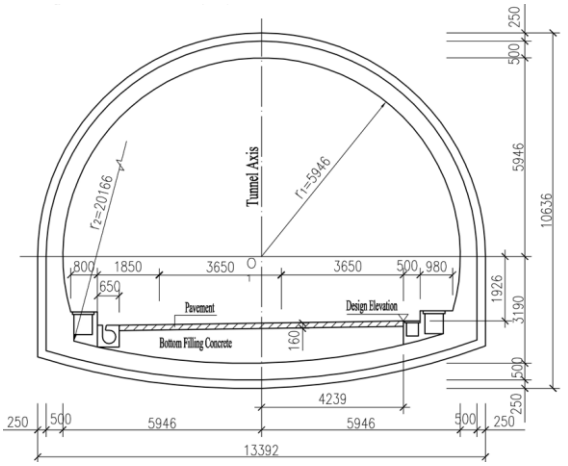
۲- مطالعه موردی

مطالعه حاضر بر روی یکی از تونل‌های واقع در مسیر منطقه یک پروژه آزادراه تهران شمال واقع‌شده است. منطقه یک آزادراه تهران شمال به طول حدود ۳۲ کیلومتر (حدفاصل اتوبان شهید همت تا سه‌راهی شهرستانک) مشتمل بر ۴۰ دستگاه تونل بوده که مطالعه حاضر بر روی تونل منتهی به محدوده بخش سولقان این پروژه متمرکزشده است. در این محدوده از پروژه، دو دستگاه تونل مجزا و موازی به طول هر یک حدود ۳۶۰ متر احداث شده که تحت عنوان تونل‌های چپ و راست نام‌گذاری شده‌اند. مقطع عرضی این تونل‌ها در شکل ۱ نشان داده‌شده است. حفاری این تونل‌ها به روش طاق و پایه مشتمل بر ۴ مرحله اصلی پیش تحکیم، طاق، پایه و کف بند مطابق با شکل ۲ انجام شده است.

مطالعه حاضر بر روی بخش انتهایی تونل و در محل تقاطع با بخش حومه‌ای روستای سولقان واقع‌شده است. موقعیت ساخت گاه این تونل در شکل ۳ نشان داده‌شده است. محدوده ساخت گاه تونل در بخش جنوبی پهنه البرز مرکزی و سازند کرج (متعلق به دوران ائوسن میانی با ۳۰۰۰ متر ضخامت) واقع‌شده است. وضعیت زمین‌شناسی محدوده ساخت گاه تونل در شکل ۳ نشان داده‌شده است.

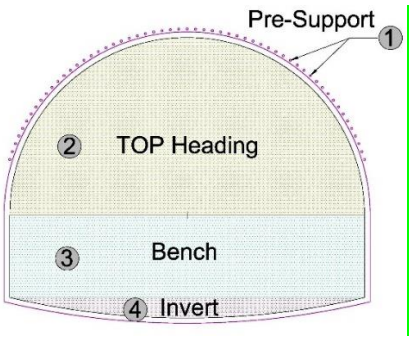


الف) تونل سمت راست



ب) تونل سمت چپ

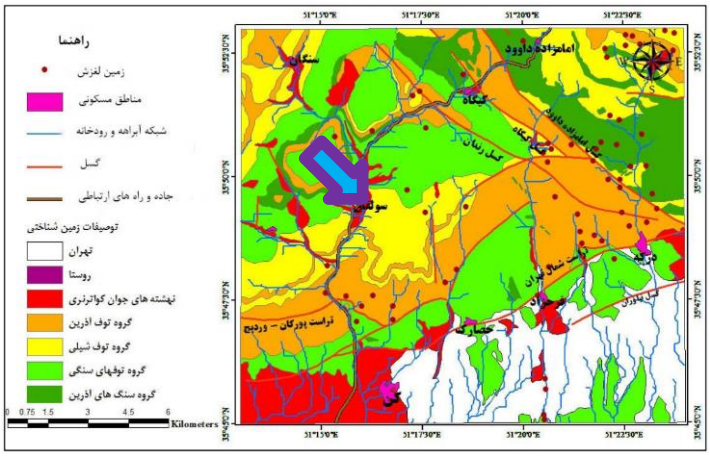
شکل ۱: مقطع عرضی تونل‌های موردبررسی [۲۵].



شکل ۲: مراحل حفاری تونل‌های موردبررسی.

ازنظر زمین‌شناسی، محدوده موردبررسی از واریزه‌های کواترنری و سنگ‌های رسوبی دوره ائوسن (متعلق به سازند کرج) تشکیل شده است. به خاطر فعالیت‌های تکتونیکی زیاد، سطح زمین دارای مورفولوژی جوان متشکل از کوه‌های بلند همراه با تعداد قابل‌توجهی آبراهه‌های سنگی و همچنین مخروط افکنه‌های ناشی از شیب شست (Slope Wash) است. در محدوده موردبررسی، مصالح واریزه‌ای کواترنری بر روی زمین سنگی واقع‌شده که این نوع مصالح عمدتاً از فرسایش توده‌های بالادست تشکیل‌شده است. عمده این مصالح دارای دانه‌بندی بین ۱ الی ۵ میلی‌متر با شکل تیز گوشه هستند. در زیر مصالح واریزه‌ای، توده سنگ‌های مربوط به عضو شیلی آسارا از سازند کرج واقع شده که لیتولوژی غالب توده سنگ محدوده موردمطالعه عمدتاً از لایه‌های سیلتستون بوده است. در حدود ۱۵ متر از بخش انتهایی تونل (از پرتال خروجی تا ۱۰ متر مانده به پرتال) در واریزه‌های شیب شست کواترنری، حدود ۱۰ متر بعدی در زمین مختلط واریزه ای-سنگی و سایر طول تونل در زمین سنگی واقع‌شده است. برای تعیین ویژگی‌های ژئومکانیکی محدوده ساخت گاه، از آزمایش‌های برجا، آزمون‌های آزمایشگاهی و طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ استفاده‌شده است. عمده خواص مصالح واریزه‌ای با استفاده از آزمون برجا شامل آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (با قطر ۷۶ سانتی‌متر) و آزمون برش مستقیم (با ابعاد ۳۰ سانتی‌متر در ۳۰ سانتی‌متر) تعیین‌شده که مقادیر حاصل در جدول ۱ خلاصه‌شده است. ویژگی‌های سنگ بکر شامل مقاومت فشاری، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ بکر حاصل از گمانه‌های ژئوتکنیکی تعیین‌شده است. سپس، با برداشت طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ با تأکید بر اندیس GSI و با استفاده از نرم‌افزار Roclab، پارامترهای توده سنگ تخمین زده‌شده است. خلاصه نتایج مربوط به برآورد ویژگی‌ها و خواص توده سنگ در جدول ۲ نشان داده‌شده است.

عملیات احداث تونل موردبررسی به روش تاج و پله مبتنی بر روش NATM انجام‌شده است. در هر گام پیشروی، ابتدا بخش تاج با طول گام حدود ۰/۵ متر (برای محدوده شروع تونل از سمت دهانه خروجی) حفاری‌شده و سپس سامانه نگهداری موقت مشتمل بر ۳۰ سانتی‌متر شاتکریت مسلح با دولایه مش فولادی نمره ۶ میلی‌متر و چشمه ۱۰ سانتی‌متر همراه با لتیس ۴ میلگردی با میلگرد قطر ۲۵ میلی‌متر تیپ ۱۴۰ میلی‌متر بافاصله لتیس گذاری نیم متر نصب‌شده است. علاوه بر این، سامانه پیش تحکیم شامل لوله‌های فولادی مانسمان قطر ۵۶ میلی‌متر باضخامت جداره ۶ میلی‌متر و طول ۶ متر با زاویه حدود ۱۰ درجه به‌صورت چتری اجراشده است. این لوله‌ها در زمان نصب با دوغاب سیمانی تزریق‌شده‌اند.



شکل ۳: موقعیت ساخت گاه تونل بر روی نقشه جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی.

جدول ۱: مشخصات ژئومکانیکی نهشته‌های واریزه‌ای مسیر تونل [۲۵].

پارامتر	مقدار
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱۹۰۰
چسبندگی (مگا پاسکال)	۰٫۰۰۶۸
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۵
مدول الاستیسته (مگا پاسکال)	۳۰
ضریب پواسون	۰٫۲۲

جدول ۲: مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ مسیر تونل بر اساس نتایج حاصل از نرم‌افزار RocData [۲۵].

پارامتر	مقدار
GSI	۳۵
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۲۶۰۰
چسبندگی (مگا پاسکال)	۰٫۱۷۴
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۵۴
مدول الاستیسته (گیگا پاسکال)	۲٫۶۶
ضریب پواسون	۰٫۲۵
mb	۰٫۹۸
s	۰٫۰۰۰۷
a	۰٫۵۱۶

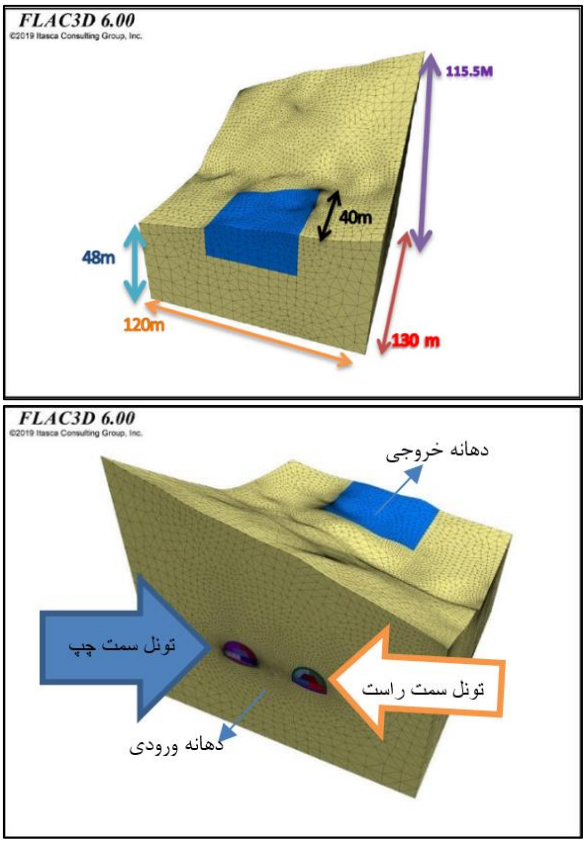
۳- مدل‌سازی عددی

هر دو نوع مصالح تشکیل‌دهنده زمین درون‌گیر تونل شامل نهشته‌های واریزه‌ای و توده سنگ با دسته درزه‌های فراوان (مطابق با جدول ۲) را ازنظر رفتاری می‌توان به‌صورت شبه پیوسته در نظر گرفت. بر این اساس، برای مدل‌سازی اندرکنش تونل و زمین درون‌گیر، از نرم‌افزار FLAC3D استفاده شد.

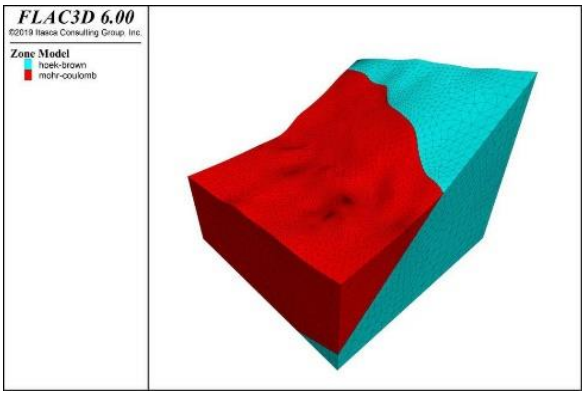
با توجه به تغییرات شدید روباره در محدوده موردبررسی، مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن توپوگرافی واقعی از محدوده انجام شد. مدل ساخته‌شده دارای طول ۱۳۰ متر، عرض ۱۲۰ متر و ارتفاع متغیر از ۴۸ متر الی ۱۱۵٫۵ متر است. فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها مطابق با شرایط واقعی در حدود ۳۰ متر در نظر گرفته شد.

نمای کلی از مدل سه‌بعدی ایجادشده در محیط نرم‌افزار FLAC3D همراه با مش بندی مورداستفاده در شکل ۴ نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است، بخش آبی‌رنگ از مدل شکل ۴ مربوط به ترانشه‌های پرتال خروجی تونل است.

مصالح محدوده دربرگیرنده تونل از دو نوع جنس شامل واریزه‌های از نهشته‌های واریزه‌ای و زمین سنگی تشکیل‌شده که این دو نوع مصالح در مدل عددی در نظر گرفته‌شده است. نمای کلی از مدل عددی سه‌بعدی همراه با موقعیت هر یک از این زون‌ها در شکل ۵ نشان داده‌شده است. مصالح واریزه‌ای با استفاده از مدل رفتار موهر-کلمب و زمین سنگی با مدل رفتاری هوک-براون در مدل عددی لحاظ شده‌اند.



شکل ۴: نمای سه‌بعدی از مدل عددی از زاویه روبرو (شکل بالا) و پشت (شکل پایین) همراه با ابعاد دامنه و نحوه مش بندی.



شکل ۵: نمای سه‌بعدی از موقعیت نهشته‌های واریزه‌ای و زمین سنگی در مدل عددی.

خصوصیات ژئومکانیکی مصالح تشکیل‌دهنده محدوده شامل نهشته‌های واریزه‌ای و توده سنگ به ترتیب مطابق با جدول‌های ۱ و ۲ در نظر گرفته شده و به زون‌های مربوطه در مدل عددی تخصیص داده‌شده است.

بعد از تخصیص خصوصیات و ویژگی‌های ژئومکانیکی، شرایط مرزی مدل تعریف‌شده است. برای مرزهای جانبی، شرط مرزی به‌صورت غلطکی (امکان جابجایی در راستای موازی مرزهای جانبی و عدم جابجایی در راستای عمود بر صفحه مرز جانبی) و برای کف مدل، شرط مرزی صلب اعمال شد. سطح مربوط به توپوگرافی زمین نیز از نوع آزاد در نظر گرفته شد. با توجه به توپوگرافی متغیر شکل نسبتاً پیچیده سطح زمین و همچنین وجود دو نوع مصالح متفاوت، میزان تنش‌های برجای اولیه به‌صورت متغیر بین ۰٫۵ الی ۱٫۲ (برای رسیدن مدل به تعادل به‌صورت اتوماتیک) در نظر گرفته شد.

مدل‌سازی فرآیند حفاری و نصب سیستم نگهداری مطابق با شرایط اجرایی انجام‌شده است. بدین منظور، ابتدا، حفاری و نگهداری بخشی از تونل تا فاصله ۵۴ متری از دهانه خروجی انجام‌شده است. در مرحله بعد، حفاری مربوط به ترانشه برداری بخش روباز در موقعیت دهانه خروجی انجام‌شده است. با اعمال این دو مرحله، حدود ۵۴ متر از بخش انتهایی تونل باقیمانده که این محدوده، در ادامه حفاری‌شده است. حفاری بخش باقیمانده از سمت دهانه خروجی و با گام‌های نیم متری انجام‌شده است. کلیه گام‌های حفاری و نصب سیستم نگهداری اولیه تونل این محدوده به‌صورت تک‌به‌تک انجام‌شده است. برای این بخش از تونل، علاوه بر سیستم نگهداری اولیه (لتیس و شاتکریت مسلح)، سامانه پیش نگهداری نیز در نظر گرفته‌شده است.

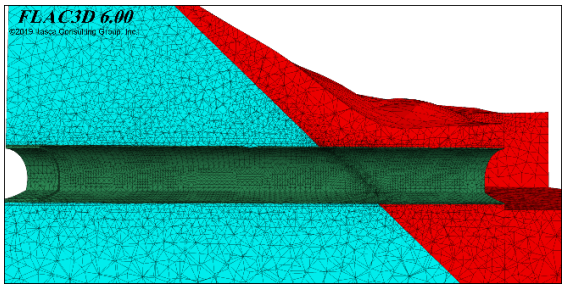
برای مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری از دو روش متفاوت استفاده‌شده است. درروش اول، سامانه پیش نگهداری با استفاده از المان سازه‌ای شمع (Pile) باقابلیت تحمل نیروی محوری، ممان‌های خمشی و نیروی برشی انجام شد. بدین منظور، تعداد ۲۱ لوله با قطر ۵۶ میلی‌متر باضخامت جداره ۶ میلی‌متر با پرکننده دوغاب بتنی (با مدول ۲۰ گیگا پاسکال و چگالی ۲۴ کیلو نیوتن بر مترمکعب) داخل لوله در اطراف تاج تونل سمت چپ و ۲۷ لوله در اطراف تاج تونل سمت بافاصله داری ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. المان‌های پایل به طول ۶ متر با چگالی ۷۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول یانگ ۲۰۰ گیگا پاسکال با همپوشانی ۲ متر زاویه قرارگیری نسبت به افق ۱۰ درجه در مدل عددی اعمال شد. برای رعایت این موضوع، هر مجموعه المان‌های پایل به طول ۶ متر در مدل اعمال‌شده و بعد از ۴ متر پیشروی سینه‌کار، ردیف بعدی المان‌ها مجدداً نصب‌شده به‌گونه‌ای که ۲ متر همپوشانی لوله‌های ردیف جدید با ردیف قبلی حاصل شود.

درروش دوم، سامانه پیش نگهداری به‌صورت یک ناحیه معادل در اطراف تاج تونل در نظر گرفته شد. به‌منظور تعیین ویژگی‌های ناحیه معادل، از روش پیشنهادی هوک (۲۰۰۴) مبتنی بر میانگین‌گیری وزنی استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح درون‌گیر تونل (واریزه و توده سنگ) و همچنین فولاد لوله‌ها و دوغاب پرکننده پیش‌تر معرفی شد که بر اساس میزان درصد وزنی هریک از اجزای تشکیل‌دهنده ناحیه معادل، ویژگی‌ها و خواص این ناحیه با میانگین‌گیری وزنی محاسبه شد. ناحیه معادل با سه ضخامت مختلف ۲۰، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر (باهدف تحلیل حساسیت) در نظر گرفته شد که ویژگی‌ها و خواص هر یک از ضخامت‌های معادل به تفکیک دو نوع زمین واریزه‌ای و سنگی محاسبه و در مدل عددی اعمال‌شده است. به‌طور نمونه، ویژگی‌های ناحیه معادل باضخامت معادل ۲۰ سانتی‌متر در جدول ۳ ارائه‌شده است. این محاسبات، برای طول ۱ متر و ضخامت ۲۰ سانتی‌متر انجام‌شده که قطر لوله‌ها ۵۶ میلی‌متر (۰٫۰۵۶ متر) با ضخامت گوشته ۶ میلی‌متر (۰٫۰۰۶ متر) با فاصله‌داری ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. به‌طور مشابه، خواص معادل برای سایر ضخامت‌ها نیز به‌طور مشابه محاسبه‌شده که به دلیل مشابهت از ارائه آن‌ها صرف‌نظر شده است.

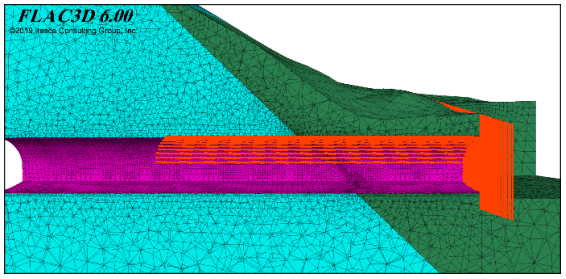
به‌منظور تحلیل حساسیت، مدل‌سازی محدوده موردبررسی با سه روش مختلف شامل ۱-مدل بدون اعمال سامانه پیش نگهداری، ۲- سامانه پیش نگهداری با المان سازه‌ای پایل و ۳- سامانه پیش نگهداری با ناحیه معادل انجام‌شده است. نمای کلی از مقایسه این سه روش در شکل ۶ نشان داده‌شده است. در بخش بعد، نتایج حاصل از هر یک از این روش‌ها مورد ارزیابی و تحلیل قرارگرفته است.

جدول ۳: خواص معادل برای ناحیه تقویت‌شده باضخامت ۲۰ سانتی‌متر

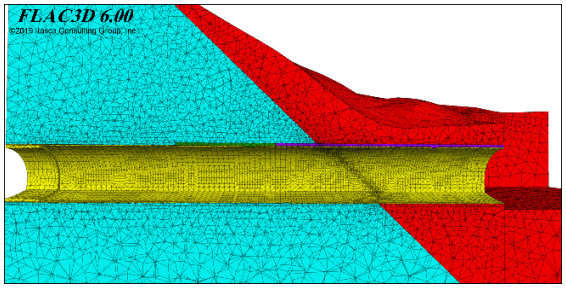
نوع مصالح	مساحت برای طول واحد (مترمربع)	درصد وزنی سطح برای طول واحد (درصد)	حاصل‌ضرب مساحت وزنی در مدول الاستیک (گیگا پاسکال)	حاصل‌ضرب درصد وزنی در چگالی (کیلو نیوتن بر مترمکعب)
واریزه	۰٫۲	۹۶٫۳۸	۰٫۰۲۴	۱۸٫۳۱
سنگ	۰٫۲	۹۶٫۳۸	۲٫۱۲	۲۵٫۰۶
دوغاب	۰٫۰۰۶	۲٫۹	۰٫۷	۰٫۶۹
فولاد	۰٫۰۰۱۵	۰٫۷۲	۱٫۴۴	۰٫۵۷
زون معادل واریزه‌ای	۰٫۲۰۷۵	۱۰۰	۲٫۱۶	۱۹٫۵۷
زون معادل سنگی	۰٫۲۰۷۵	۱۰۰	۴٫۲۶	۲۶٫۳۲



الف) بدون استفاده از چتر سقفی



ب) چتر سقفی المان سازه‌ای



ج) چتر سقفی با زون معادل

شکل ۶: نمای کلی از سه رویکرد مختلف برای مدل‌سازی عددی و تحلیل مسئله.

۴- نتایج و بحث

همان‌گونه که در بخش پیشین توضیح داده شد، مدل‌سازی عددی اندرکنش زمین-سامانه نگهداری برای حالت‌های مختلفی و باهدف مقایسه رویکردهای مختلف مدل‌سازی انجام‌شده است. در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل‌های مختلف برای مدل‌ها با رویکردهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

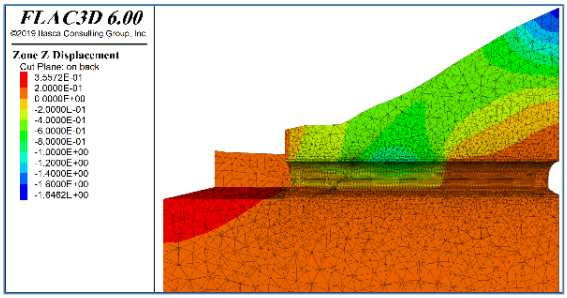
به‌منظور بررسی نیازسنجی سامانه پیش نگهداری، ابتدا، نتایج مدل عددی بدون اعمال این سامانه موردبررسی قرارگرفته است. سپس، بخشی از نتایج مدل‌سازی عددی برای بخش خاصی از تونل و باهدف اعتبارسنجی مدل عددی ارائه‌شده است. درنهایت، نتایج حاصل از مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در بخش‌های بعد، هر یک از این نتایج با جزئیات بیشتری موردبررسی قرارگرفته‌اند.

۴-۱- مدل‌سازی تونل بدون سامانه پیش نگهداری

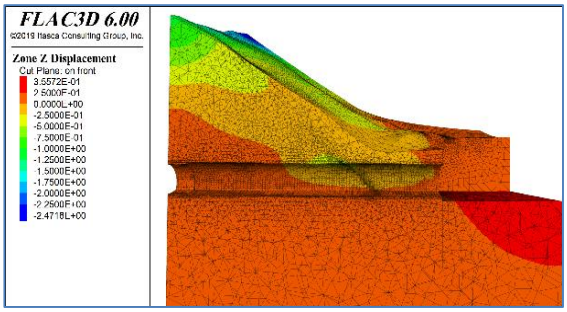
در گام نخست، مدل‌سازی عددی فرآیند حفاری و نصب سیستم نگهداری موقت تونل بدون اعمال سامانه پیش نگهداری در مدل عددی (باهدف ارزیابی اثر سامانه پیش نگهداری با انجام مقایسه بین مدل عددی با سامانه و بدون سامانه پیش نگهداری) موردبررسی قرارگرفته است. نتایج مدل عددی برای تونل بدون اعمال سامانه پیش نگهداری در قالب کانتورپلات جابجایی قائم ناشی از حفر و اعمال سامانه نگهداری موقت تونل (شاتکریت مسلح و لتیس گیردر) به تفکیک تونل چپ و راست در شکل ۷ نشان داده‌شده است.

مطابق با شکل ۷، در صورت عدم اعمال سامانه پیش نگهداری، میزان جابجایی‌های قائم ناشی از حفر تونل‌های چپ و راست بسیار زیاد است. برای تونل راست، بیشترین میزان جابجایی قائم در تاج تونل‌های راست و چپ به ترتیب به حدود ۱ متر و ۶۵ سانتی‌متر می‌رسد. برای هر دو تونل، مقدار بیشینه جابجایی قائم تاج تونل در فاصله حدود ۳۵ الی ۴۰ متری از پرتال پیش‌بینی‌شده است که در این مقطع، بیشترین روباره واریزه‌ای وجود داشته است. همچنین، جابجایی‌های قائم از تاج تونل تا سطح زمین نیز با نرخ

تغییرات نسبتاً کمی ادامه یافته که در این حالت، جابجایی سطح زمین دارای مقادیر قابل‌توجهی خواهد بود.



الف) تونل راست



ب) تونل چپ

شکل ۷: جابجایی قائم ناشی از حفر تونل بدون اعمال سامانه پیش نگهداری برای تونل‌های راست و چپ.

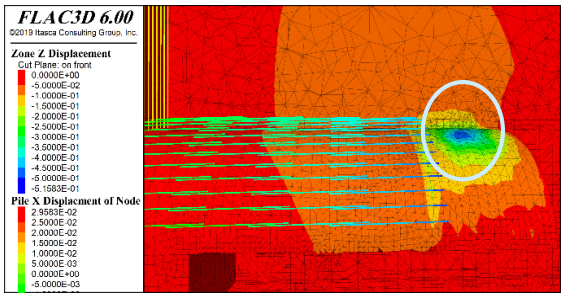
بررسی نتایج مدل‌سازی عددی بدون اعمال سامانه پیش نگهداری برای هر دو تونل راست و چپ حاکی از شدت زیاد جابجایی‌ها است. این جابجایی‌ها به دلیل ضعیف بودن زون واریزه‌ای (پایین بودن پارامترهای مقاومتی به‌ویژه چسبندگی و همچنین مدول الاستیسیته پایین زون واریزه) حادث می‌شود. عمده جابجایی‌های قائم در این زون نیز در زمان حفاری سینه‌کار رخ می‌دهد. در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های پیش تحکیم در جلوی سینه‌کار باعث بهبود وضعیت جابجایی‌ها در محدوده سینه‌کار خواهد شد. این موضوع در بخش‌های بعد موردبررسی قرارگرفته است.

۴-۲- اعتبارسنجی مدل عددی

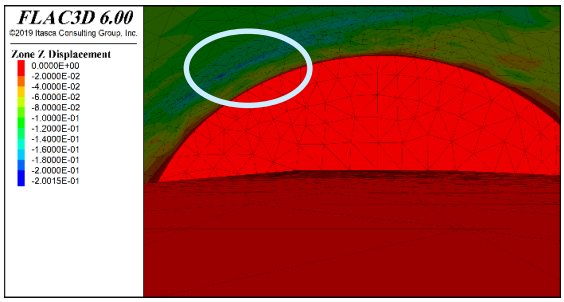
به‌منظور اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی مدل‌سازی عددی، مقایسه بین نتایج مدل عددی و یکی از ریزش‌های حادث‌شده در حین عملیات حفاری تونل انجام‌شده است. عملیات پیشروی تونل‌های موردبررسی از سمت دهانه خروجی با اعمال سامانه پیش نگهداری (چتر سقفی) انجام‌شده است. بااین‌وجود، در یک برهه زمانی خاص، به دلیل مسائل اجرایی، بخشی از تونل سمت چپ بدون نصب این سامانه انجام شد که در این محدوده، بعد از پیشروی سینه‌کار به‌اندازه دو گام حفاری، ریزش تاج تونل حادث شد. این ریزش در فاصله حدود ۱۹ متری از دهانه رخداده که عملیات پیشروی کل طول ۱۸ متر قبل از وقوع این ریزش با اعمال سامانه پیش نگهداری انجام‌شده بود. بعد از متراژ ۱۸ متر بر اثر عدم استفاده از سامانه چتری بعد از دو گام پیشروی تاج تونل ریزش کرده که این ریزش در نیمه سمت چپ تونل (در بخش واریزه‌ای) حادث‌شده است. نمای کلی از این ریزش در شکل ۸ نشان داده‌شده است. مطابق با شکل ۸، بعد از پیشروی سینه‌کار تونل بدون نصب سامانه پیش نگهداری، ریزش در جلوی سینه‌کار تونل (موقعیت ساعت ۱۰ تا ۱۱) حادث‌شده و مصالح واریزه‌ای این بخش به داخل تونل ریزش کرده است. همچنین، در همین موقعیت، بخشی از سازه سیستم نگهداری موقت تونل (لتیس و شاتکریت) دچار شکست شده است.

شکل ۸: نمای کلی از ریزش حادث‌شده در موقعیت ۱۹ متری از دهانه خروجی تونل چپ.

به‌منظور ارزیابی کارایی مدل‌سازی عددی، شرایط اجرایی انجام‌شده در تونل در خصوص پیشروی و سامانه پیش نگهداری در مدل عددی اعمال شد. بدین منظور، پیشروی تونل به طول ۱۸ متر با اعمال سامانه پیش نگهداری با استفاده از المان سازه‌ای شمع و سپس حفاری دو گام پیشروی بدون اعمال سامانه پیش نگهداری در مدل عددی در نظر گرفته شد. بعد از حل مدل عددی مربوط به این محدوده، نتایج حاصل در قالب کانتورهای تغییر شکل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مدل عددی به‌صورت کانتورپلات‌های جابجایی قائم در راستای پروفیل طولی تونل و همچنین مقطع عرضی در شکل ۹ نشان داده‌شده است.



الف) مقطع طولی تونل



ب) مقطع عرضی از داخل تونل

شکل ۹: جابجایی قائم ناشی از حفر تونل بدون اعمال سامانه پیش نگهداری برای تونل‌های راست و چپ.

مطابق با شکل ۹، در نیمه سمت چپ تونل جابجایی‌های قائم حادث‌شده در نزدیکی سینه‌کار به‌طور ناگهانی و با شدت بسیار زیادی افزایش‌یافته است. شدت جابجایی‌ها در جلوی سینه‌کار (شکل ۹-الف) بسیار بیشتر از جابجایی‌های پشت سینه‌کار بوده که مقدار جابجایی قائم در مرز تونل و جلوی سینه‌کار به حدود ۵۰ سانتی‌متر رسیده است. این شدت جابجایی معادل با وقوع ریزش در زمین بالای سینه‌کار است که در واقعیت نیز ریزش بخش واریزه‌ای در همین موقعیت حادث‌شده است. موقعیت این ریزش در واقعیت در شکل ۸ به‌صورت مارک شده نشان داده‌شده است.

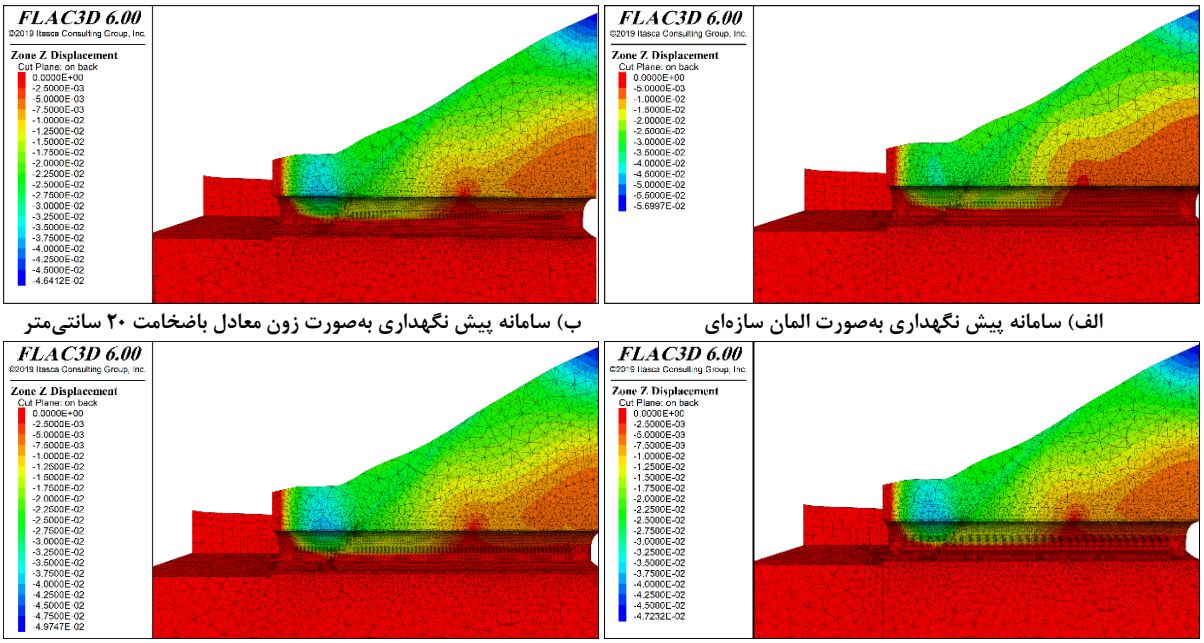
مطابق با شکل ۹-ب، شدت جابجایی‌های حادث‌شده در سیستم نگهداری تونل نیز به‌طور عمده‌ای زیاد است. در محدوده نزدیک به سینه‌کار تونل، میزان جابجایی قائم پیش‌بینی‌شده در سیستم نگهداری موقت تونل در حدود ۲۰ سانتی‌متر است. این مقدار از جابجایی معادل با شکست بخشی از سیستم نگهداری موقت تونل بوده که این شکست در واقعیت نیز به وقوع پیوسته است (شکل ۹). مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی مورداستفاده بخش مهمی از شواهد و رخدادهای حادث‌شده در واقعیت را به‌طور مناسبی ارزیابی نموده و از این نظر، استفاده از این مدل عددی برای سایر اهداف عملی به‌ویژه تحلیل پارامتریک با دقت موردنیاز امکان‌پذیر خواهد بود.

۴-۳- مقایسه رویکردهای مختلف مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری

یکی از مهم‌ترین اهداف این مطالعه، مقایسه و بررسی تأثیر رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری در مدل‌سازی عددی است. به‌منظور بررسی اثر این رویکردها، مدل‌سازی سامانه پیش نگهداری تونل با دو رویکرد مختلف شامل ۱- المان‌های سازه‌ای خطی و ۲-زون معادل در اطراف دیواره تونل انجام‌شده و نتایج این مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. لازم به ذکر است، در رویکرد دوم، ناحیه معادل با سه ضخامت مختلف شامل ۲۰، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر و باهدف تحلیل حساسیت ضخامت زون معادل نیز انجام‌شده است. نتایج حاصل از هر یک از مدل‌های فوق‌الذکر در شکل ۱۰ و به‌صورت کانتورپلات جابجایی قائم ناشی از حفر تونل سمت راست نشان داده‌شده است.

کانتورهای جابجایی قائم برای هر ۴ مدل عددی موردبررسی شامل مدل با اعمال سامانه پیش نگهداری به‌صورت المان سازه‌ای (شکل ۱۰-الف) و مدل‌های اعمال سامانه پیش نگهداری به‌صورت زون معادل باضخامت‌های ۲۰، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر (به ترتیب شکل ۱۰-ب الی ۱۰-د) ازنظر توزیع فضایی و مقادیر جابجایی دارای شباهت‌های بسیار زیادی هستند. در هر چهار حالت فوق‌الذکر، بیشترین جابجایی قائم تاج تونل در بخش انتهایی تونل (نزدیک به دهانه خروجی تونل) و در فاصله حدود ۱۵ الی ۲۰ متری از دهانه خروجی (محل تقاطع مرز دو واحد مختلف زمین‌شناسی) رخداده است. در حقیقت، در محل تغییر مصالح از واریزه‌های کواترنری به توده سنگ در سقف تونل، بیشترین جابجایی در مدل‌های عددی به ثبت رسیده است. این تغییر زون زمین‌شناسی پیش‌تر و بر روی شکل ۶ نشان داده‌شده است.

برای همه مدل‌های موردبررسی، با افزایش فاصله از محل دهانه خروجی (حرکت به سمت داخل تونل)، مقادیر جابجایی قائم با نرخ تقریباً یکسانی تغییر می‌یابد. الگوی جابجایی قائم در اطراف بخش فوقانی تونل (روباره) بر روی مقطع طولی در هر چهار مدل تطابق نسبتاً زیادی ازنظر شکل و آرایش فضایی است.



الف) سامانه پیش نگهداری به‌صورت المان سازه‌ای

ب) سامانه پیش نگهداری به‌صورت زون معادل باضخامت ۲۰ سانتی‌متر

ج) سامانه پیش نگهداری به‌صورت زون معادل باضخامت ۳۰ سانتی‌متر

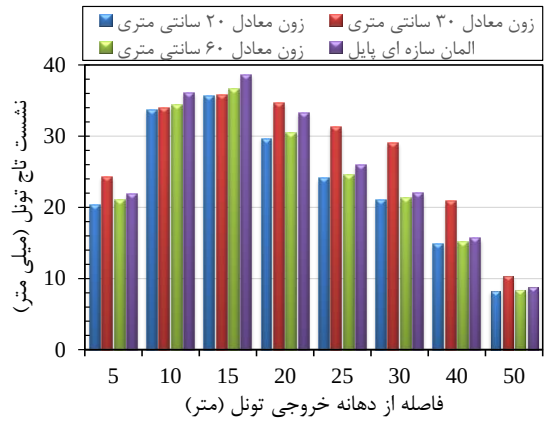
د) سامانه پیش نگهداری به‌صورت زون معادل باضخامت ۶۰ سانتی‌متر

شکل ۱۰: کانتورپلات جابجایی قائم ناشی از حفر تونل راست برای مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری.

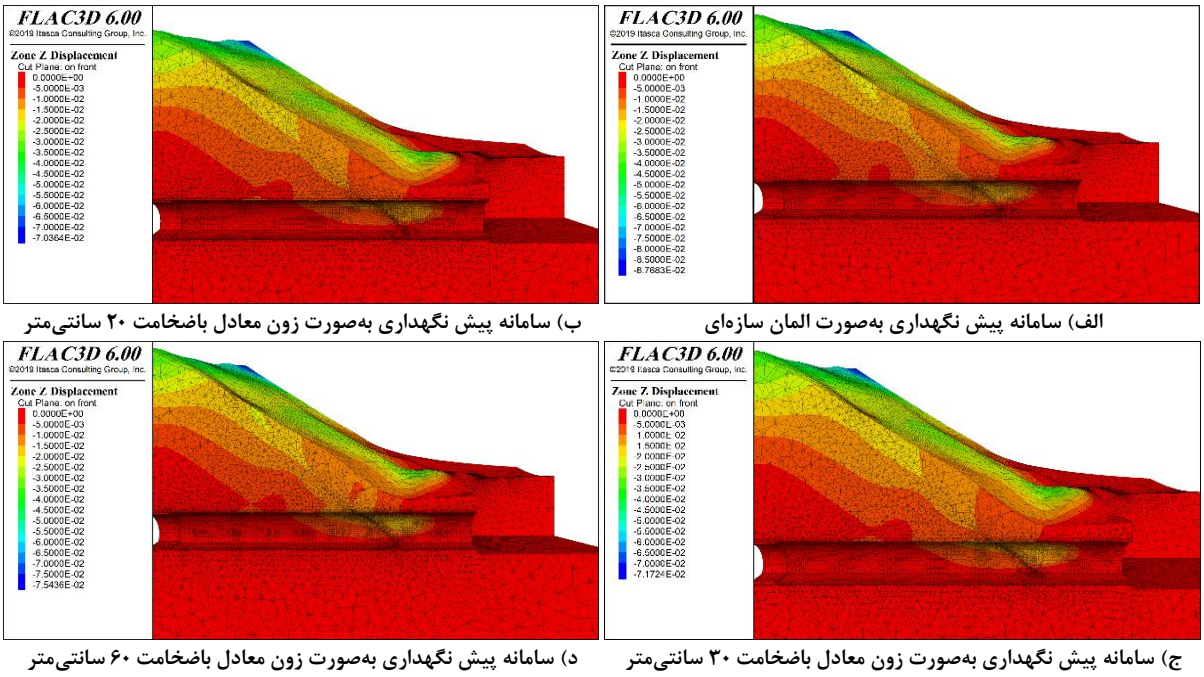
مقایسه نتایج شکل ۱۰ حاکی از شباهت بسیار زیاد بین خروجی مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف است. به‌منظور مقایسه بهتر این نتایج، مقادیر جابجایی پیش‌بینی‌شده در تاج تونل با مدل‌های مختلف برای فواصل مختلف از دهانه تونل محاسبه و ماحصل آن در شکل ۱۱ نشان داده‌شده است.

مطابق شکل ۱۱، برای اکثر مقاطع موردبررسی در فواصل مختلف از دهانه خروجی تونل، مقادیر جابجایی پیش‌بینی‌شده با روش‌های مختلف بسیار نزدیک به هم هستند (هم ازنظر مقداری و هم ازنظر توزیع فضایی کانتورهای جابجایی در اطراف تونل به‌ویژه در بخش روباره). در اکثر مقاطع موردبررسی برای تونل سمت راست، جابجایی قائم تاج تونل برای مدل با سامانه پیش نگهداری به‌صورت المان سازه‌ای پایل و مدل با زون معادل باضخامت ۳۰ سانتی‌متری بیشتر از سایر مدل‌ها است. بااین‌وجود، در عمده موارد، اختلاف بین نتایج مدل‌های مختلف بسیار اندک است. بیشترین اختلاف بین نتایج مدل‌های مختلف در حدود ۸ درصد بوده ولی به‌طورکلی، میزان خطای نسبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده جابجایی (جابجایی قائم) تاج تونل با روش‌های مختلف به‌طور متوسط در حدود ۲/۷ درصد است.

توزیع الگوی جابجایی قائم در اطراف تونل سمت چپ برای مدل‌های مختلف شامل مدل با اعمال سامانه پیش نگهداری به‌صورت المان سازه‌ای و مدل‌های اعمال سامانه پیش نگهداری به‌صورت زون معادل باضخامت‌های ۲۰، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر به ترتیب در شکل ۱۲-الف الی ۱۲-د نشان داده‌شده است. مطابق با این شکل، مقادیر جابجایی قائم پیش‌بینی‌شده با مدل‌های مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری، ازنظر توزیع فضایی و مقادیر جابجایی دارای تطابق نسبتاً زیادی هستند. برای مقایسه بهتر، مقادیر جابجایی پیش‌بینی‌شده در تاج تونل با مدل‌های مختلف برای فواصل مختلف از دهانه تونل چپ محاسبه و ماحصل آن در شکل ۱۳ نشان داده‌شده است.



شکل ۱۱: مقایسه جابجایی قائم تاج تونل سمت راست برای مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری در فواصل مختلف از دهانه خروجی.



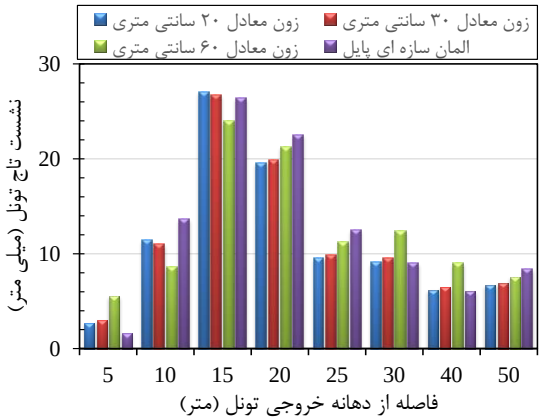
الف) سامانه پیش نگهداری به‌صورت المان سازه‌ای

ب) سامانه پیش نگهداری به‌صورت زون معادل باضخامت ۲۰ سانتی‌متر

ج) سامانه پیش نگهداری به‌صورت زون معادل باضخامت ۳۰ سانتی‌متر

د) سامانه پیش نگهداری به‌صورت زون معادل باضخامت ۶۰ سانتی‌متر

شکل ۱۲: کانتورپلات جابجایی قائم ناشی از حفر تونل چپ برای مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری.



شکل ۱۳: مقایسه جابجایی قائم تاج تونل سمت چپ برای مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری در فواصل مختلف از دهانه خروجی.

مطابق با شکل ۱۳، برای اکثر مقاطع موردبررسی در فواصل مختلف از دهانه خروجی تونل، مقادیر جابجایی پیش‌بینی‌شده با روش‌های مختلف بسیار نزدیک به بوده و در عمده موارد، اختلاف بین نتایج مدل‌های مختلف چندان قابل‌توجه نیست. بیشترین اختلاف بین نتایج مدل‌های مختلف در حدود ۱۷ درصد بوده ولی به‌طورکلی، میزان خطای نسبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده جابجایی (جابجایی قائم) تاج تونل با روش‌های مختلف به‌طور متوسط در حدود ۵/۱ درصد است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری در مدل‌های عددی شامل المان‌های سازه‌ای خطی و زون معادل در اطراف دیواره تونل با تمرکز بر مطالعه موردی آزادراه تهران شمال موردبررسی قرارگرفته است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در این مطالعه، نتایج زیر حاصل‌شده است:

۱- مقادیر جابجایی‌های ناشی از حفر تونل در حالت بدون استفاده از سامانه پیش نگهداری بسیار زیاد بوده (به دلیل ضعیف بودن زمین بالای تونل) که در چنین شرایطی، استفاده از پیش نگهداری در جلوی سینه‌کار باعث بهبود قابل‌توجه وضعیت جابجایی‌ها در اطراف و بالای تونل خواهد شد.

۲- نتایج مدل عددی مورداستفاده هم ازنظر محل وقوع ریزش و هم محل وقوع شکست سازه تحکیمات موقت در پشت سینه‌کار دارای انطباق بسیار خوبی با شواهد و رخدادهای حادث‌شده در واقعیت است. با توجه به کارآیی مدل عددی در پیش‌بینی بخش مهمی از شواهد و رخدادهای حادث‌شده در واقعیت، استفاده از این مدل عددی برای سایر اهداف عملی به‌ویژه تحلیل پارامتریک با دقت موردنیاز امکان‌پذیر خواهد بود.

۳- جابجایی‌های قائم پیش‌بینی‌شده مدل‌های عددی با اعمال سامانه پیش نگهداری به‌صورت المان سازه‌ای و مدل‌های مبتنی بر زون معادل باضخامت‌های ۲۰، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر ازنظر توزیع فضایی و مقادیر جابجایی دارای شباهت‌های بسیار زیادی هستند. در عمده موارد، اختلاف بین نتایج مدل‌های مختلف دارای مقادیر نسبتاً کمی بوده و میزان خطای نسبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده جابجایی (قائم) تاج تونل با روش‌های مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری به‌طور متوسط برای تونل راست در حدود ۲٫۷ درصد و برای تونل سمت چپ در حدود ۵٫۱ درصد است.

با توجه به اختلاف نسبتاً اندک‌بین نتایج حاصل از مدل‌های عددی با رویکردهای مختلف اعمال سامانه پیش نگهداری به‌صورت المان سازه‌ای و مدل‌های مبتنی بر زون معادل، استفاده از هر یک از این دیدگاه‌ها برای مقاصد مدل‌سازی امکان‌پذیر خواهد بود. یکی از مهم‌ترین کارکردهای این استنتاج در به‌کارگیری روش مناسب برای تحلیل‌های دوبعدی بوده که در این‌گونه مدل‌ها، به‌کارگیری روش المان‌های خطی سازه‌ای چندان امکان‌پذیر نیست. بر این اساس، برای مقاصد مدل‌سازی دوبعدی، استفاده از مدل عددی مبتنی بر زون معادل پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

[1] Volkmann, GM and Schubert. W (2006). "A contribution to the design of tunnels Supported with pipe roof support." In: Rock mechanics in underground construction: ISRM international symposium 2006: 4th Asian rock mechanics symposium. World scientific Pub. Co. Inc, Singapore

[2] Muraki, Y (1997). "The Umbrella Method in Tunnellin. M.S, Civil Engineering." Massachusetts Institute of Technology.

[3] Japan Society of Civil Engineers, (2018). "Standard Specifications for Tunneling-2016: Mountain Tunnels."

[4] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, (2009). "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels —Civil Elements." Publication No. FHWA-NHI-09-010

[5] Marinos, VP (2013). "Assessing rock mass behaviour for tunnelling." Environmental & Engineering Geoscience, XVIII(4), 327–341.

[6] Oke, J. Vlachopoulos, N and Diederichs, M.S (2014)."Umbrella Arch Nomenclature and Selection Methodology for Temporary Support Systems for the Design and Construction of Tunnels." Geotech Geol Eng (2014) 32:97–130.

[7] Harazaki, I., Anon, H., Matsuda, A., Aoki, T and Hakoishi. Y (1998). "Field observation of large supported by umbrella method: case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan." In: Tunneling and Metropolises, Proceedings of the World Tunneling Congress, pp. 1009–1014

[8] John, M and Mattle. B (2002). "Design of tube umbrella." Magazine of the Czech Tunnelling Committee and Slovak Tunnelling Association, 3.

[9] Peila, D. and Pelizza. S (2003). "Ground reinforcing and steel pipe umbrella system in tunnelling." In: Kolymbas, D. (Ed.), Rational Tunneling: Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling. Logos Verlag, Berlin, Innsbruck, pp. 93–132.

[10] Oreste, P and Peila. D (1998). "A new theory for steel pipe umbrella design in tunnelling." Tunnels Metropol., 1033–1039

[11] Wang, H and Jia, J (2008). "Analytical method for mechanical behaviors of pipe roof reinforcement." In: International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. Institute of Electrical andElectronics Engineers (IEEE), pp. 352–357.

[12] Song, K.I., Cho, G.C., Chang, S.B and Lee, I.M (2013). "Beam-spring structural analysis for the design of a tunnel pre-reinforcement support system." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 59, 139–150.

[13] Oke, J, Vlachopoulos. N and Diederichs. MS (2014). "Numerical analyses in the design of umbrella arch system." J Rock Mech Geotech Eng 6(6):546–564

[14] Volkmann, G and Schubert. W (2009). "Effects of Pipe Umbrella Systems on the Stability of the Working Area in Weak Ground Tunneling." of SINOROCK 2009, Hong Kong, Chin.

[15] Ocak, I (2008). "Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro." Tunnle Undergr Sp Technol 23:674–681

[16] Bagherzadeh, P and Goshtasbi. K (2013). "Numerical modeling of umbrella arch method in collapsing zones." J Mine Metals Fuels 61(11):332–336

[17] Klotoé, C.H and Bourgeois. E (2019). "Three dimensional finite element analysis of the influence of the umbrella arch on the settlements induced by shallow tunneling." Computers and Geotechnics, 110, 114–121. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.02.017

Aygar, E.B. and Gokceoglu, C. (2021). Analytical solutions and 3D numerical analyses of a shallow tunnel excavated in weak ground: a case from Turkey. Geo-Engineering, 12:9. https://doi.org/10.1186/s40703-021-00142-7

[18] Siad, I., Akchiche, M. and Spyridis, P. (2023). Effect of the Umbrella Arch Technique Modelled as a Homogenized Area above a Cross Passage. Appl. Sci., 13, 1588. https://doi.org/10.3390/app13031588

[19] Naeini, S.A and Mohammadi-Haji. B (2015). "Numerical Modeling of Soil Improvement for Construction of Tunnels Using Forepole Presupport." International Journal of Structural and Civil Engineering Research, 4(4), 366-370..

[20] Ağbaya, E and Topal. T (2020). "Evaluation of twin tunnel-induced surface ground deformation by empirical and numerical analyses (NATM part of Eurasia tunnel, Turkey)." Computers and Geotechnics, 119, 103367.

[21] Karamniayi Far, M. and Dehghan A.N. (2019). "The Effect of Pre-Support System (Forepoling) on the Control of Ground Surface Subsidence caused by SEM/NATM in Shallow Urban Road Tunnels under Railway Traffic Loading". Tunneling & Underground Space Engineering, 7(2), 63-85. (In Persian)

[22] Hoek, E (2004). "Numerical Modelling for Shallow Tunnels in Weak Rock."

[23] Hefny, A.M., Zhao j., Ranjith, P and Tan, W.L (2000), "Numerical Analysis for Umbrella Arc Method in Shallow Large Scale Excavation in Weak Rock".

[24] Javadi, M. (2020). Engineering Geology Investigation and Detail Design of LK08+060 to LK08+180 of Tehran-Shomal Freeway, Lot01. Research Study in Shahrood University of Technology , (In Persian).