مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
زمستان ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۴ صفحه ۱ تا ۱۷

ارزیابی عددی روشهای تحکیم و بهسازی در تونل البرز

علیرضا احمدی [۱]، مجید نیکخواه [۲*]، سید محمد اسماعیل جلالی [۲]، اسماعیل عیدی وندی [۳]

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

چکیده

علی‌رغم توسعه روش‌های متعدد درحفاری و تحکیم تونل‌ها، امروزه یافتن راهی مناسب برای پایدارسازی سازه‌های درون زمین امری چالش برانگیز است. استفاده از سامانه‌های پیش‌تحکیمی روشی مناسب برای بهبود بخشیدن به وضعیت زمین است. در این مطالعه به بررسی عملکرد سامانه چتری در تونل البرز در شمال ایران پرداخته شده است. مطالعات مکانیک سنگی منطقه اجرای تونل نشان داده است که بخش‌هایی از این تونل به دلیل قرار گرفتن در مناطق سست دارای ظرفیت ناپایداری و ریزش بوده، و بنابراین در این مناطق اجرای عملیات تونل‌سازی با روش‌های نگهداری متداول جوابگو نیست. براین اساس سامانه پیش‌تحکیم چتری که برای زمین‌های سست و ریزشی قابل استفاده است، بصورت عددی توسط نرم‌افزار FLAC 3D مدل‌سازی شده است. در تحقیق حاضر علاوه بر بررسی عملکرد سامانه چتری، اثر پارامترهای هندسی از جمله زاویه‌ی قرارگیری لوله‌ها نسبت به افق و فاصله‌ی بین لوله‌های سامانه چتری با در نظر گرفتن شعاع تزریق مورد بررسی قرار گرفته است. جابجایی رخ داده در تاج تونل، برای معیار بررسی و کارایی در نظر گرفته شده است. نتایج این مطالعه مبین این است که افزایش زاویه و کاهش فاصله‌ی بین لوله‌ها باعث افزایش پایداری شده و با استفاده از سامانه چتری فورپلینگ، نشست تاج تونل به میزان ۷۰٪ نسبت به حالت بدون پیش تحکیم کاهش یافته است.

کلید واژه‌ها: *پیش‌تحکیم لوله‌گذاری، مدل‌سازی عددی، پیش‌تحکیم میله‌گذاری، سامانه چتری، تونل.*

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۲. عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۳. دانشجویان دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
* مسئول مکاتبات، m.nikkhah@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

تونل‌سازی در محیط‌های ضعیف باعث ایجاد گسیختگی‌های موضعی در محدوده فاقد سامانه نگهدارنده و همچنین ایجاد شرایط ناپایدار در سینه‌کار تونل می‌شود. همواره سازه‌ای مورد نظر است که حتی در شرایطی که مقاومت زمین کم است، ایمن و اقتصادی باشد (Volkmann et al. 2006). در سالهای اخیر در پروژه‌های تونل‌سازی، استفاده از روش چتری در زمین‌های سست و ناپایدار برای پایدارسازی محیط مورد توجه قرار گرفته است. این روش در مواردی که نگهداری سریع و کنترل تغییر شکلها به منظور فراهم آوردن شرایط ایمن مد نظر باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش مواد تقویت‌کننده مانند دوغاب تزریقی از طریق لوله‌های سوراخ‌دار به درون منطقه‌ی مورد نظر تزریق می‌شوند (Muraki, 1997). کاربرد روش قوس چتری، ناحیه تاثیر حفاری تونل و تاثیر تونل بر روی سطح و زیر سطح را کاهش می‌دهد. لوله‌های چتری، فشار اعمال‌شده بر روی سقف تونل را جبران می‌کنند. یکی دیگر از اثرات مهم حفاری تونل این است که نشست زمین پس از حرکت جبهه‌کار روی می‌دهد (Aksoy and Onargan, 2010). این روش، در مقایسه با روش‌های پیش تحکیم دیگر مثل انجماد ، لوله‌رانی و ستون‌های حاصل از تزریق با جت، اغلب کارآمدتر و روش اجرای آن نیز به مراتب ساده‌تر است. سیستم‌های پیش‌تحکیم در واقع سیستم‌هایی هستند که فضای پشت جبهه کار را برای حفاری مقاوم‌سازی می‌کنند (Volkmann and Schubert, 2007). سیستم چتری جز روش‌های پیش تحکیم بوده و پیش از حفر تونل لوله‌هایی با قطر ۶۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت بین ۴ تا ۸ میلی‌متر با استفاده از ماشین آلات خاصی مثل دستگاه حفاری جامبوها با زاویه حدود ۵ تا ۱۰ درجه نسبت به افق به سمت بیرون حفاری و نصب می‌شوند. این سیستم نیازمند عریض‌تر کردن مقاطع بصورت تدریجی است که پروفیل کلی بصورت دندانه اره‌ای خواهد شد (اشکال ۱و۲). طول لوله‌ها و تزریق می‌تواند بین ۱۲ تا ۱۵ متر متغیر باشند. بعد از تزریق محیط درونی و فضای خالی محیط بین لوله و زمین، حفاری در زیر نگهداری این لوله‌ها پیشرفت خواهد کرد. بعد از حفاری به اندازه‌ای که از قبل تعیین گشته است، عملیات مجدد انجام می‌شود. چتر به وجود آمده که به صورت مخروط‌های ناقص و دارای همپوشانی است، نگهداری محیط را فراهم می‌آورد. در واقع در این سیستم کنترل مناطق و شرایط بحرانی توسط انتقال بارهای شعاعی و طولی انجام می‌گیرد (Volkmann et al. 2006).

همانطور که طراحی حفاری‌های سازه های زیرزمینی پیچیده و پیچیده‌تر می‌شوند، تجزیه و تحلیل‌های عددی برای دستیابی به راه کار در شرایط سخت ضروری است. در این ارتباط نتیجه این تحلیلها ممکن است منجر به ضرورت نیاز به پیش نگهداری شود (Volkmann and Schubert 2007). تحلیل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی در طراحی سیستم‌های قوس چتری و پارامترهای طراحی المان‌های فورپولینگ (چتری) در ملاحظات خاص و محلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Oke et al. 2014). در طراحی لوله‌های مورد استفاده در روش قوس چتری تعیین طول، سختی، سطح مقطع (ضخامت و قطر)، زاویه نصب، فواصل بین لوله‌ها، طول همپوشانی و فشار تزریق تعیین می‌شود (Shin et al. 2008). هفنی و همکاران (Hefney et al. 2004) رفتار زمین را که توسط دو روش عددی برای شبیه‌سازی اثر تقویت قوس چتری پیش‌بینی شد، با هم مقایسه کردند. این محققین رفتار زمین را در هنگام استفاده از روش پیش نگهداری مورد استفاده در تونل‌سازی در زمین ضعیف و کم عمق مورد بررسی قرار دادند.

ولکمن و همکاران (Volkmann et al. 2006) در مطالعات خود در مورد بهینه کردن حفاری و سیستم نگهداری بیان کردند که با استفاده از روش نگهداری با لوله‌هایی در سقف (تحکیم چتری) نتایج قابل قبولی به دست می‌آید. همچنین ولکمن و شوبرت (Volkmann and Schubert, 2006) با انجام مطالعات عددی، نشست تا ۳۰ درصد را برای به کارگیری این روش در مطالعه موردی انجام شده گزارش داده‌اند. اوکاک (Ocak, 2008) با انجام مقایسه‌ای بین روش تونل‌سازی و روش پیش‌تحکیم چتری برای کنترل نشست ناشی از حفاری در زمین حاوی رس، مارن، ماسه و گل‌سنگ برای مرحله دوم تونل متروی استانبول بین شهرهای اوکاپانی و ینیکاپی، گزارش نموده‌اند که روش قوس چتری تغییرشکل‌های سطحی را به

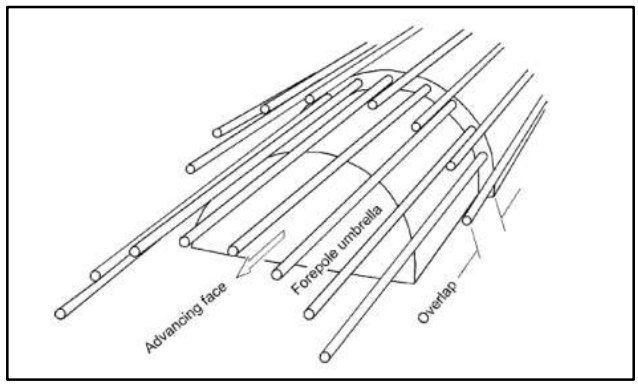
خصوص در نواحی دارای رس به خوبی کنترل می‌کند. الیاسی و همکاران (Elyasi et al. 2016) با مدل‌سازی عددی روش قوس چتری در تونلی در شمال غرب ایران توسط نرم افزار عددی FLAC 3D نشان دادند که این روش برای گذر از تونل در شرایط ژئوتکنیکی بسیار ضعیف روشی ایمن است. زارعی و همکاران (Zarei et al. 2019) نقش طاق‌زنی با لوله و اجرای پیچ‌سنگ در جبهه کار بر روی پایداری ورودی شمالی تونل سبزکوه را با استفاده از روش عددی سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار دادند. اثرات پارامترهای طراحی مانند زاویه نصب لوله‌ها، قطر لوله‌ها و فاصله عرضی لوله‌ها در عملکرد سیستم قوس چتری از طریق مدل‌سازی عددی در مطالعه آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر، مدل‌سازی عددی سه بعدی برای یافتن روش بهینه‌ی اجرای سیستم پیش نگهدارنده‌ی فورپلینگ در تونل البرز، به عنوان گزینه‌ی انتخابی تحکیم توده سنگ خیلی ضعیف دربرگیرنده‌ی تونل، انجام گرفته است. همچنین عملکرد کلی پیشرفت و مراحل انجام طرح با مدل‌سازی در شرایط مختلف اجرای عملیات مقایسه شده و در نهایت پایداری تونل نسبت به روش ارائه شده، ارزیابی گردیده است. عملکرد ساختاری این روش در مراحل مختلف حفاری و همچنین در لوله‌های واقع در تاج تونل و پیرامون آن بررسی و مقایسه شده است. از آنجا که پارامترهای هندسی سیستم قوس چتری از قبیل زاویه قرارگیری لوله‌ها و فاصله بین آنها و همچنین پارامترهای فیزیکی از جمله نسبت آب به سیمان در دوغاب و شعاع تزریق در تامین پایداری تونل نقشی موثر دارند، با بررسی داده‌های موجود و تعیین پارامترهای دوغاب و ناحیه تحکیم در اطراف لوله‌ها و مدل‌سازی عددی به بررسی هریک از عوامل مذکور پرداخته شده است.

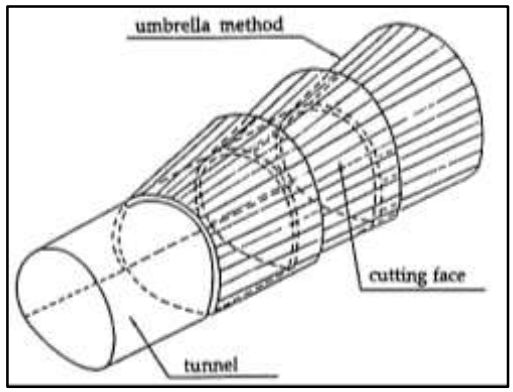
۲. مشخصات مطالعه موردی تونل البرز

تونل البرز بخشی از آزادراه تهران–شمال است که کرج را به شهر چالوس متصل می‌کند. تونل البرز با ۶۳۷۸ متر طول، طولانی‌ترین تونل این آزادراه محسوب می‌شود. مقطع تونل به‌صورت نعل اسبی است و عرض دهانه آن ۱۳ متر است. تونل مذکور در رشته‌کوه البرز و در شمال ایران واقع شده است. این تونل از لحاظ زمین‌شناسی در سازند شمشک و کرج قرار دارد. لیتولوژی مسیر تونل در مسیر رفت در دهانه‌ی شمالی عمدتاً از توف‌ها (سیاه، سبز، خاکستری)، آندزیت (سبز و خاکستری) انیدریت، سنگ آهک، ماسه‌سنگ، آرژیلیت و گابرو تشکیل شده است. آن قسمتهایی از مسیر حفاری که توده سنگ ضعیف بوده و مستعد ناپایداری است (مناطق گسلی) مورد مطالعه قرار گرفته است. طولانی‌ترین گسل در متراژ ۳۲۴۰ تا ۳۴۳۶ قرار دارد که این ناحیه باعث خواص مکانیک سنگی ضعیفی شده است. حفاری تونل به روش آتشباری کنترل شده در دو مقطع انجام می‌شود، ابتدا قسمت نیم‌دایره‌ای بالایی حفر می‌شود و پس از نصب سیستم‌های نگهداری اولیه و پایدارسازی مقطع حفاری شده، قسمت پایین حفر می‌شود.

به طور کلی برای پایدارسازی تونل در طول مسیر از ۴ نوع سیستم نگهداری استفاده می‌شود که متناسب با وضعیت توده‌سنگ مسیر تونل، یکی از انواع نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطور کلی سیستم نگهداری شامل میل‌مهارهای ۴٫۵ متری، لوله‌گذاری و میله‌گذاری، شاتکریت و مش فولادی و لتیس گریدر است. ضخامت پوشش بتنی متغیر بوده و گاهی به ۶۰ سانتی‌متر هم می‌رسد. عملیات پیش‌تحکیم چتری و تزریق و تحکیم در نواحی گسلی و توده‌سنگ ضعیف در طراحی دیده شده است (جنرال مکانیک – لانیز، ۱۳۹۳). پارامترهای ژئومکانیکی منطقه مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. توصیف سیستم نگهداری چتری مورد استفاده در تونل‌سازی (Schumacher, 2012).



شکل ۲. طرح شماتیک روش پیش تحکیم طاق چتری در حفاری تونل (چتر ایجاد شده در هر مرحله (Muraki, 1997) .

جدول ۱. پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ مورد بررسی.

Property	Value
(Kg/m^3) density	2600
(MPa) Cohesion	1.3
(deg) Friction angel	30.2
(GPa) Elastic modulus	5
Poisson's ratio	0.25

۳. مدلسازی عددی

با توجه به جنس مصالح دربرگیرنده تونل و شرایط موجود، یکی از مناسب‌ترین روش‌های مدل‌سازی برای تحلیل چنین تونلی، با در نظر گرفتن محیط پیوسته استفاده از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار سه بعدی FLAC است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای این تحلیل مدل رفتاری موهر-کولمب است. ناحیه مورد مطالعه از تونل با دهانه ۱۳/۶ متر و ارتفاع ۱۰/۳ متر و روباره ۶۰۰ متر شبیه‌سازی شده است. هدف تحقیق حاضر مقایسه روش‌های مختلف بهسازی پیش تحکیم توده‌سنگ است. سیستم لوله‌گذاری مورد استفاده بدون درز با قطر ۹۰ میلی‌متر و ضخامت جداره ۷/۲ میلی‌متر با پارامترهای مقاومتی فولاد در نظر گرفته شده است. پارامترهای ژئومکانیکی توده

سنگ برای ناحیه مورد مطالعه توده سنگ ضعیف با استفاده از نرم‌افزار RocLab بدست آمده و در مدلسازی عددی به کار برده شده است (شکل ۳). برای یافتن مقدار نسبت تنش برجا افقی به قایم، میانگین مقادیر حاصل از روابط تجربی ترزاقی، شئوری و هوک و براون بدست آمده و از میانگین آنها به عنوان مقدار نسبت تنش افقی به قائم در مدلسازی استفاده گردیده است. این مقدار برابر با ۰,۴۲ بوده و در پارامترهای مربوط به شرایط زمین در فرآیند مدلسازی قرار گرفته است، که با توجه به نوع گسل نرمال موجود در مسیر تونل تطابق وجود دارد. پارامترهای هندسی و مقاومتی المان شمع به صورت ترکیبی برای مدلسازی دوغاب، لوله و مخلوط دوغاب و سنگ در برگیرنده توسط نرم افزار Section Builder محاسبه شده است. در جدول ۲ مشخصات اجزای میل مهار و میله گذاری نشان داده شده است.

فاصله مقطع بالایی از مقطع پایینی براساس شرایط اجرایی تونل در این مرحله از حفاری در حدود ۱/۵ کیلومتر است. برای تامین نگهداری از روش پیش تحکیمی میله‌گذاری، که جزء سیستم‌های چتری است، و سیستم نگهداری اولیه میل‌مهارهای شعاعی، شاتکریت و لتیس‌گریدر استفاده شده است. میل‌مهارهای بکار رفته در دیواره به صورت شعاعی دارای قطر ۲۵ میلی‌متر با طول ۴/۵ متر می‌باشند که با فاصله‌داری ۱/۲۵ متر از هم پس از اتمام حفاری و پس از اجرای شاتکریت در جای خود قرار می‌گیرند. شاتکریت به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر به صورت توام با نصب لتیس‌گریدرها پاشیده می‌شود. میل مهارها در وسط هر سیکل نصب می‌شوند، به این صورت که پس از حفر ۱/۲۵ متر، میل مهارها در فاصله ۰/۶۲۵ متری از جبهه‌کار به صورت شعاعی نصب می‌شوند. میله‌ها ۶ متر و میل مهارها ۴/۵ متر هستند. پس از نصب میله‌ها و رسیدن به مقاومت مورد نظر ۱/۲۵ متر از مقطع بالایی تونل حفر شده و سیستم نگهداری اولیه بلافاصله نصب می‌گردد. پس از حفاری دو سیکل مجددا عملیات میله‌گذاری برای بوجود آمدن همپوشانی به طول ۳ متر انجام می شود. برای معادل سازی شاتکریت و لتیس گیر در سامانه تحکیم موقت تونل در فرآیند مدل‌سازی لازم است که از روش حل مقاطع مختلط استفاده شود. این روش به خوبی در تحلیل‌های مهندسی سازه شناخته شده است. برای این منظور رفتار لایه نگهدارنده‌ی تونل که مقطع متشکل از دو ماده‌ی مختلف شاتکریت و مجموعه پروفیل‌های فولادی لتیس گریدر هستند بر اساس تئوری ارتجاعی پوسته ها و رفتار تیرهای منحنی محاسبه شده و در مدلسازی اعمال شده اند.

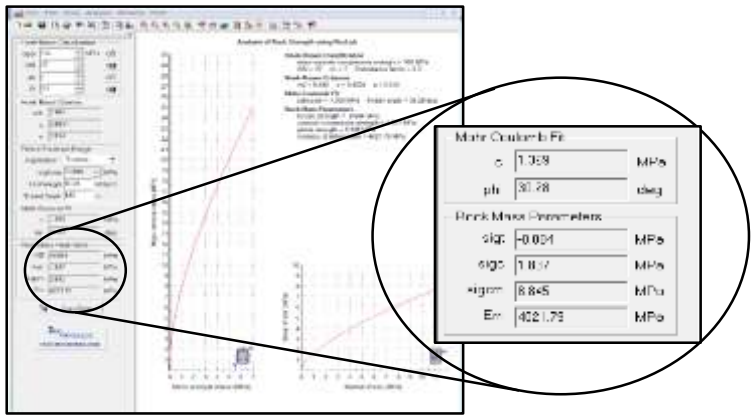
۴. بحث و نتایج

۴-۱. بررسی لزوم استفاده از پیش تحکیم

در ابتدا عملیات حفاری تونل بدون استفاده از سامانه پیش تحکیم جهت مشخص شدن وضعیت تعادل و جابجایی‌های ناشی از حفاری انجام شده است. درشکل ۴ جابجایی مربوط به ناحیه حفاری شده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر جابجایی تا سطح مدل گسترده شده است. در این حالت بیشترین جابجایی در تاج تونل در طی ۶۰ متر حفاری از تاج تونل برابر با حدود ۹,۵ سانتی‌متر است. با رسم مقطع طولی جابجایی‌های تونل در مدل فاقد سیستم پیش‌تحکیمی چنانچه در شکل ۵ مشاهده می‌شود، جابجایی‌ها در فاصله ۱۹ تا ۲۰ متری از مرکز تونل به مقدار ثابتی می‌رسند و بنابراین برای بدست آوردن جابجایی‌ها لازم است تا حدود دو برابر این طول (در اینجا ۴۰ متر) حفاری شود.

مقادیر جابجایی قائم بیان شده مربوط به تاج تونل در قسمت ورودی بوده که بیشترین جابجایی در آن اتفاق افتاده است، اما با توجه به پروفیل جابجایی می‌توان مشاهده کرد که جابجایی تاج تونل در ۱۹ متری جبهه کار تونل ۸/۴ سانتی‌متر است و قبل آن جابجایی‌ها در راستای قائم یکنواخت شده‌اند.

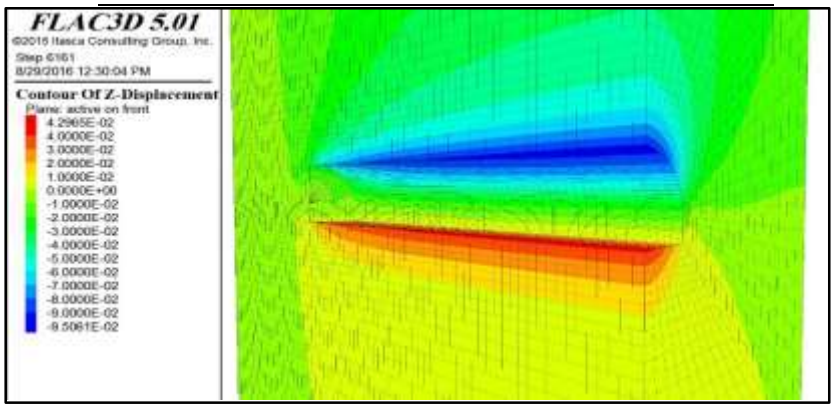
با در نظر گرفتن یک نقطه نشانه در تاج تونل در دهانه ی ورودی، امکان مشاهده تغییرات جابجایی در تاج تونل در گام‌های مختلف فرآیند تحلیل عددی درشکل ۶ فراهم شده است. در این قسمت مشاهده می‌شود که نقطه مورد نظر در مراحل ابتدایی جابجایی زیادی داشته و به تدریج به تعادل رسیده است.



شکل ۳. پارامترهای بدست آمده از نرم‌افزار RocLab (خصوصیات توده سنگ).

جدول۲. خصوصیات اجزای میله گذاری.

Components characteristic	Value
Spilling Anchor diameter(mm)	25
Spilling anchor Length(m)	6
Overlapping Length (m)	3
Dip of first row (deg)	15 and 30 resp.
Dip od scond row (deg)	15
spacing of rows(cm)	50
Spilling anchors spacing(cm)	80
Water/cement ratio	0.5

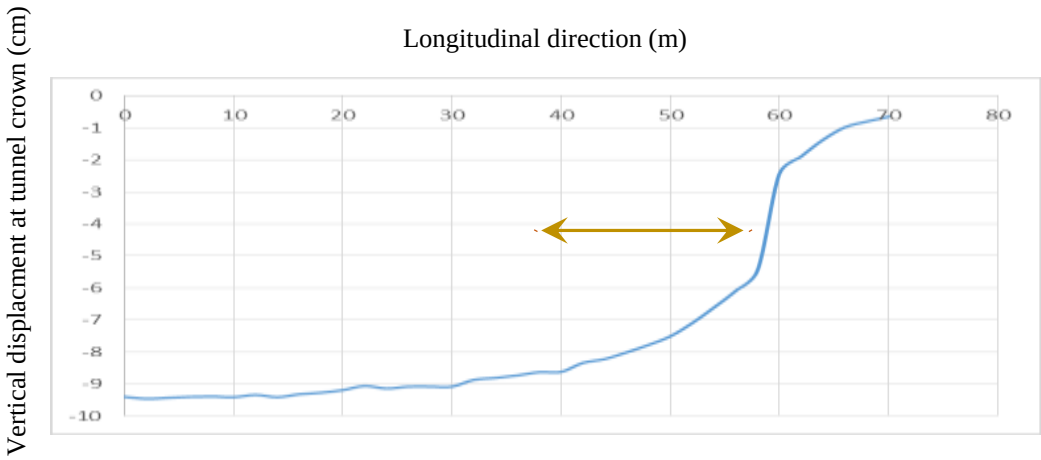


شکل ۴. جابجایی‌های قائم پیرامون تونل (بدون استفاده از سامانه پیش‌تحکیم)

۲-۴. ویژگی‌های فیزیکی مدل‌سازی با استفاده از سیستم پیش‌تحکیمی

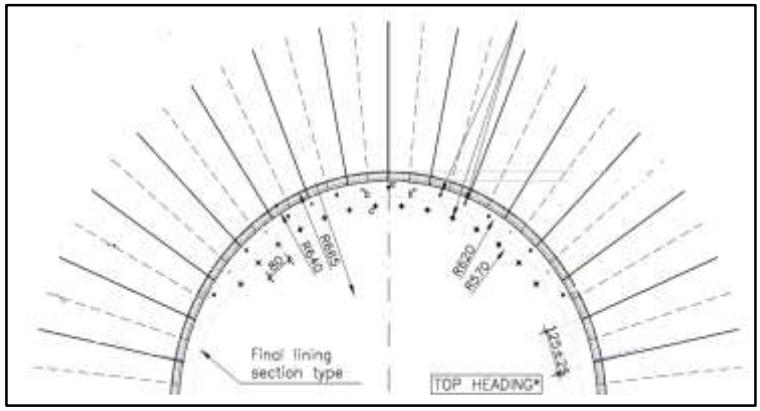
روش تحکیم طبق طرح مهندسی مشاور طرح چنانچه در شکل ۷ ملاحظه میشود شامل حفر چالهایی به قطر ۵۱ میلی‌متر سپس اقدام به قرار دادن میله‌های ۶ متری با قطر ۲۵ میلی‌متر درون آن می‌شود که پس از آن عملیات تزریق انجام می‌گیرد. مراحل مذکور در مدل‌سازی عددی اعمال و شبیه سازی شده‌اند. چالها در دو ردیف مطابق شکل بر اساس طرح مهندسی مشاور اجرا می‌شوند. پس از حفاری دو سیکل مجددا عملیات میله گذاری برای بوجود آمدن هم‌پوشانی به طول ۳ متر انجام می شود. نمایی از نصب پیش تحکیم میله گذاری تعرف شده در مدل

عددی در شکل ۸ نشان داده شده است. درحالت سیستم پیش تحکیم میله گذاری، ابتدا سیستم پیش‌تحکیم لوله‌گذاری انجام و سپس حفاری تونل صورت میگیرد. با بررسی جابجایی‌های قائم روی تاج تونل در شکل ۵ مشاهده می‌شود که در این حالت، تاج حداکثر جابجایی قائم به مقدار ۳/۹۵ سانتی‌متر کاهش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از سیستم پیش‌تحکیمی جابجایی به مقدار زیادی کاهش یافته و کنترل شده است. با توجه به شکل ۹ اثرات این کنترل جابجایی قائم نه تنها در تاج تونل، بلکه در تمامی نقاط موجود در مدل قابل مشاهده است.

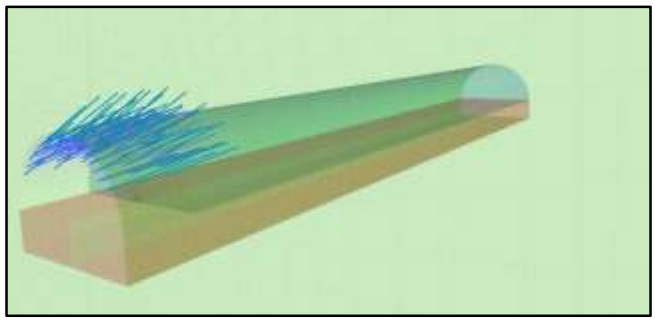


شکل ۵. جابجایی در مقطع طولی تونل مدل فاقد سامانه پیش‌تحکیمی

شکل ۶. جابجایی قائم تاج تونل در طول گامهای حفاری در مدل فاقد سامانه پیش‌تحکیمی



شکل ۷. جانمایی سامانه میله گذاری و میل مهار های شعاعی طرح مهندس مشاور (Geodata, 2015)



شکل ۸. نمای قرار گیری میله گذاری در مدلسازی عددی

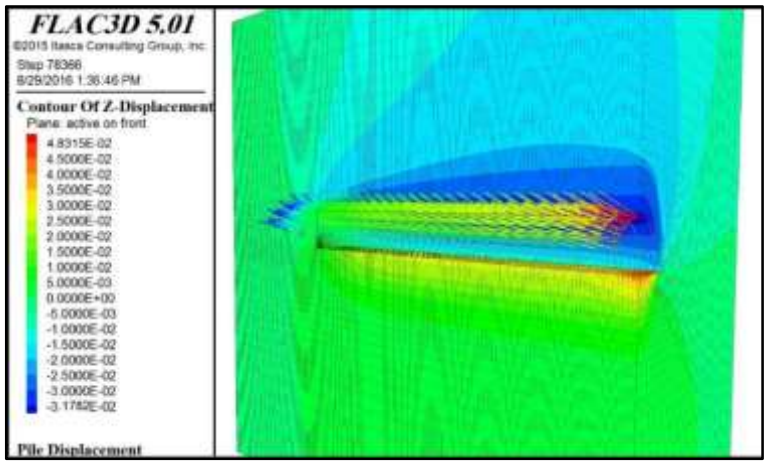
۴-۳. مدل‌سازی با استفاده از سیستم پیش‌تحکیمی میل مهار و میله‌گذاری

مدلسازی در حالت دیگری بررسی شده است، بدین ترتیب که ابتدا سیستم پیش‌تحکیم شامل لوله‌ها نصب شده و پس از آن عملیات حفاری شروع می‌شود. با این تفاوت که پس از حفاری هر گام، میل‌مهارها که سیستم نگهداری اولیه هستند نصب می‌گردند. با توجه به شرایط پایداری زمین که در این منطقه بدلیل وجود روباره زیاد و سنگ‌های خرد شده، ناپایدار است، نصب میل‌مهارهای ۴/۵ متری در حین عملیات اجرا در این منطقه در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که درشکل ۱۰ که بیانگر جابجایی قائم تاج برای مدلسازی پیش‌تحکیمی نصب میل مهار و لوله‌گذاری است، مشاهده میشود که در نقطه روی تاج تونل حدود ۳ سانتی‌متر جابجایی بدست آمده است. در شکل ۱۱ توزیع نیروی محوری در لوله گذاری را در راستای عمودی (راستای Y در مختصات محلی میله‌ها با راستای Z مختصات اصلی) را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ نشانگر لنگر ناشی از این نیرو می‌باشد. با توجه به دو شکل مذکور و مقادیر نیرو و لنگر بدست آمده می‌توان دریافت که میله‌ها درگیری لازم را با زمین داشته و فعال هستند.

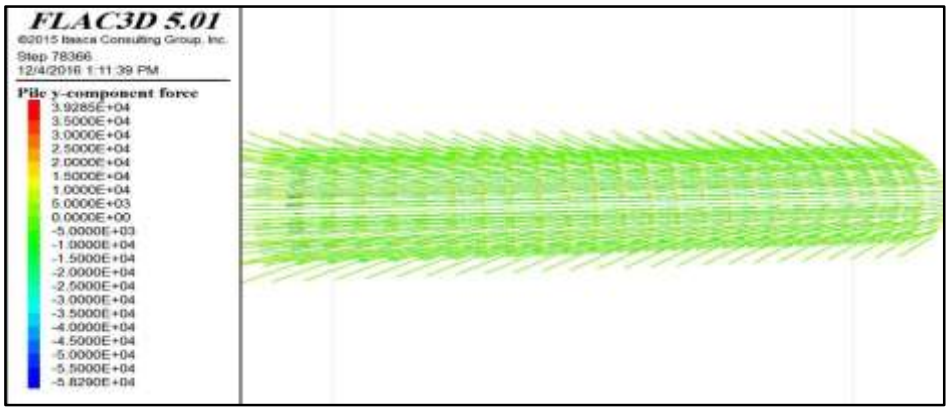
۴-۴. تعیین مدول الاستیسیته مماسی مقایسه‌ی حالات مختلف نگهداری و سیستم‌های پیش‌تحکیمی

طبق نظر ساکورایی و همکاران که مورد قبول اکثر مهندسین ژئوتکنیک است، پایداری تونل‌ها را می‌توان با مقایسه کرنش اتفاق افتاده در توده‌سنگ اطراف تونل با میزان مجاز این کرنش برای تونل‌ها بررسی کرد. اگر کرنش اتفاق افتاده کمتر از حد مجاز باشد، تونل پایدار است. کرنش اتفاق افتاده از اندازه‌گیری جابجایی‌ها بدست می‌آید. با توجه به جابجایی‌های رخ داده و رسم سطوح خطر ساکورایی می‌توان به بررسی ضرورت استفاده از سیستم پیش‌تحکیم و نگهداری اولیه پی‌برد (Sakurai, 1997 and Sakurai et al., 1933). درشکل ۱۳ مقایسه‌ی شرایط مختلف پایداری مطالعه موردی با توجه به

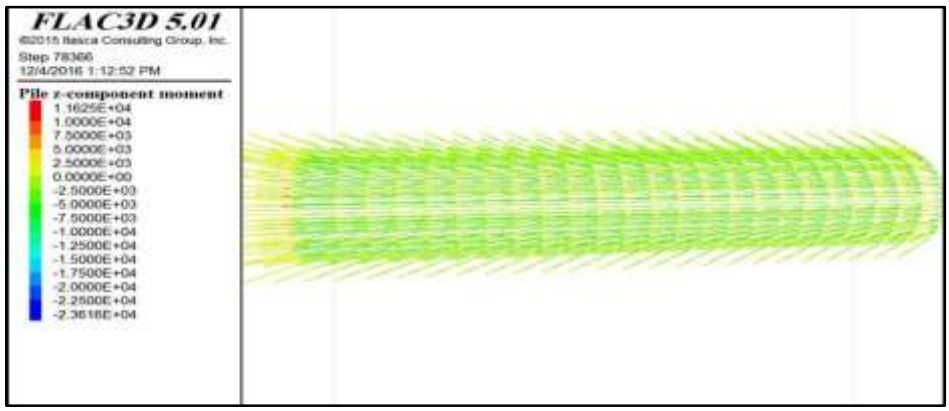
سطوح خطر معیار ساکورایی آورده شده است. جابجایی‌های رخداده در مقطع بالایی تونل در حفاری در سه حالت بدون سیستم پیش‌تحکیم، با سیستم پیش‌تحکیم لوله گذاری و با سیستم پیش‌تحکیم و میل مهاری درشکل ۱۴ قابل مشاهده است. مقادیر جابجایی در حالت بدون سیستم پیش‌تحکیم در بالای سطح دوم خطر و نزدیک به سطر اول خطر می‌باشد که در محدوده‌ی مجاز برای تونل‌ها نیست، درحالی‌که با استفاده از سیستم پیش‌تحکیم و استفاده از میل‌مهارهای شعاعی به زیر سطح دوم بوده و در محدوده‌ی مجاز تونل‌ها قرار دارد که این خود نشان دهنده‌ی آن است که استفاده از سیستم چتری و پیش‌تحکیمی لازم است. برای مقایسه نتایج حالتهای مختلف (بدون پیش‌تحکیم، با سامانه پیش‌تحکیم لوله گذاری، با سامانه پیش‌تحکیم و میل مهار)، میزان جابجایی افقی رخ داده در تاج تونل در مسیر حفاری مقطع بالایی تونل، در سه حالت مذکور در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از سیستم پیش‌تحکیم میله‌گذاری که زیر مجموعه‌ای از سیستم چتری است به میزان ۶۰٪ از جابجایی تاج نسبت به حالت بدون استفاده از این سیستم می‌کاهد. همچنین استفاده از میل مهارهای شعاعی به همراه سیستم میله‌گذاری به میزان حدود ۷۰٪ از جابجایی تاج نسبت به حالت بدون استفاده از این سیستم‌ها می‌کاهد.شکل ۱۵ نشانگر جابجایی قائم نقطه در نظر گرفته‌شده روی تاج در ابتدای دهانه در گام‌های مختلف فرآیند تحلیل برای دو حالت سامانه پیش‌تحکیم، با سامانه پیش‌تحکیم و میل مهاری است. همانطور که مشاهده می‌شود، نقطه‌ای روی تاج در قسمت ورودی در هر چرخه از فرآیند حفاری تونل در راستای قائم جابجا شده و به تعادل رسیده است.



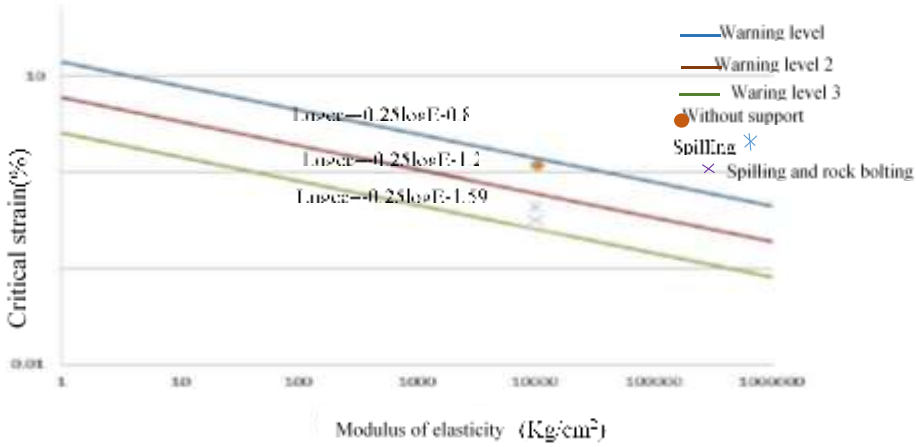
شکل۹. جابجایی‌های قائم پیرامون تونل با استفاده از سیستم پیش‌تحکیم و میله گذاری شعاعی



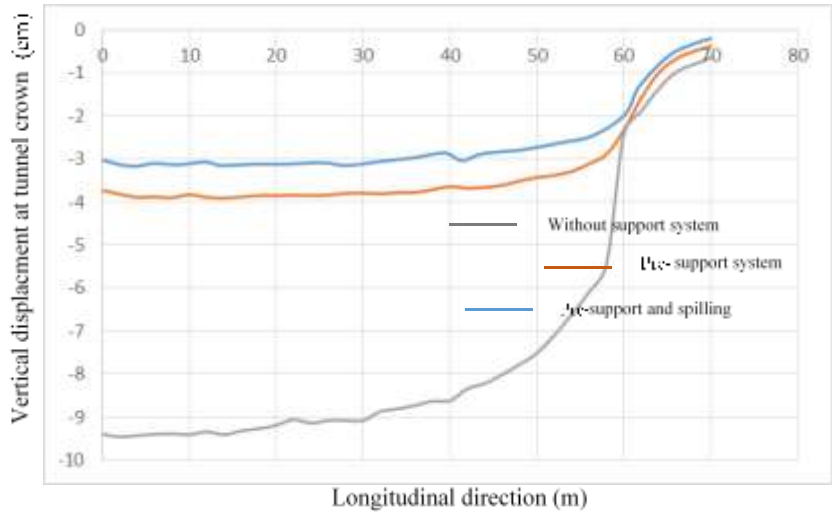
شکل۱۱. توزیع نیروی محوری در لوله‌گذاری در راستای Y.



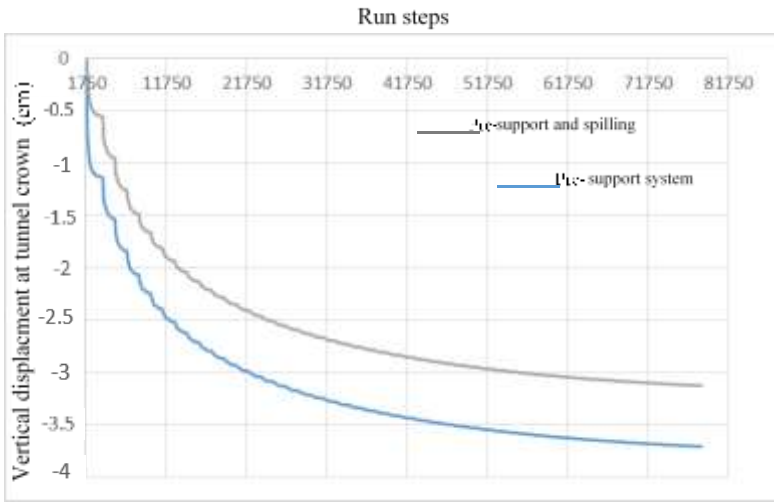
شکل۱۲. توزیع لنگر خمشی در لوله‌گذاری در راستای Z.



شکل۱۳. مقایسه شرایط مختلف وضعیت پایداری با توجه به معیار خطر ساکورایی.



شکل۱۴. جابجایی قائم تاج تونل در حالتهای مختلف (بدون پیش‌تحکیم، با سامانه پیش‌تحکیم لوله گذاری، با سامانه پیش‌تحکیم و میل مهار).



شکل۱۵. جابجایی قائم نقطه‌ی روی تاج تونل ناشی از حفاری (سامانه پیش‌تحکیم لوله گذاری، با سامانه پیش‌تحکیم لوله گذاری و میل مهاری).

۵-۴. *بررسی سامانه چتری فورپلینگ*

از آنجائیکه روش چتری فورپلینگ در محیطهای ضعیف توده سنگ و خاک امروزه به یکی از روشهای مطرح و قابل کاربرد در پیش تحکیم در توده در برگیرنده تونلها استفاده میشوند. مطالب پیش گفته شامل طرح اولیه مهندسی مشاور طرح بوده است و لذا در این بخش به مدل‌سازی عددی حالات مختلف قوس چتری فورپلینگ پیشنهادی پرداخته شده است.

۱-۵-۴. سامانه فورپلینگ پیشنهادی

برای مدل‌سازی سیستم پیش‌تحکیم از لوله مانسیون با قطر ۹۰ و ضخامت جداره‌ی ۷/۲ میلی‌متر با پارامترهای مقاومتی فولاد استفاده گردیده است. برای تعیین پارامترهای کلی دوغاب با نسبت آب به سیمان ۰/۵ که اغلب در تزریق روش چتری استفاده شده و پارامترهای سویلکریت نیز مشابه مطالعه باقرزاده و گشتاسبی در سال ۱۳۹۱ قرار گرفته است (باقرزاده و گشتاسبی، ۱۳۹۱). شعاع تزریق در این مطالعه ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در جدول ۳ پارامترهای سویلکریت استفاده شده برای مدلسازی قابل مشاهده است. برای شبیه-سازی سامانه‌های چتری با لوله و میله گذاری، در این مطالعه از مولفه‌ی پایل در نرم افزار عددی استفاده شده است.

۲-۵-۴. بررسی مراحل مختلف حفاری و نصب سامانه پیش تحکیم فورپوپلینگ

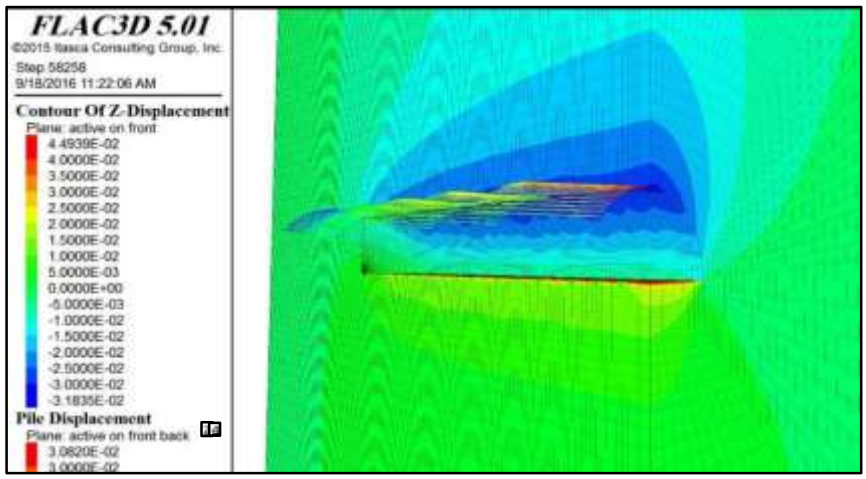
در این قسمت به بررسی استفاده از مدل‌های مختلف سیستم چتری فورپلینگ برای پیش‌تحکیم محدوده مورد تحقیق پرداخته شده است. همانطور که قبل‌تر بیان گردید، در محدوده-ی نصب میله گذاری، بررسی روش فورپلینگ انجام شده است. خصوصیات هندسی سیستم لوله‌گذاری فورپلینگ پیشنهادی در مرحله‌ی اول شامل : قطر لوله : ۹۰ میلی‌متر، ضخامت جداره : ۷,۲ میلی‌متر، طول لوله‌ها : ۱۲ متر، طول همپوشانی : ۳ متر، زاویه‌ی قرارگیری نسبت به افق : ۷ درجه و فاصله‌ی بین لوله‌ها ۴۰۰ میلی‌متر است که در قسمت‌های بعد به تغییر زاویه و تغییر فاصله بین لوله‌های فورپلینگ و بررسی اثر این تغییرها پرداخته شده است. شعاع تاثیر با فرض پر شدن کامل فضای بین لوله‌ها به مقدار فاصله مرکز به مرکز یعنی ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با این آرایش ۲۷ لوله در محدوده مورد بررسی وارد می‌شود. پس از نصب لوله‌های ۱۲ متری، اقدام به حفاری تونل و نصب سیستم‌های نگهداری اولیه می‌گردد.

حال با حفاری مقطع به بررسی شرایط محیط و عملکرد سیستم پیش‌تحکیم فورپلینگ پرداخته شده است. با توجه به لزوم در

نظر گرفتن زنجیره حفاری، مانند بخش قبلی، ابتدا لوله‌های فورپلینگ ۱۲ متری در محدوده مورد بحث وارد سقف تونل شده و سپس اقدام به حفر تونل می‌شود. پس از حفر ۷ سیکل برای بدست آوردن هم‌پوشانی سه متری، مجددا لوله‌های جدید در سقف نصب می‌شوند. جابجایی‌های قائم رخ داده در اطراف ناحیه حفاری شده در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر جابجایی تا سطح مدل گسترده شده‌اند. بیشترین مقدار جابجایی قائم رخداده در تاج تونل در مسیر حفاری حدود ۳ سانتی‌متر بدست آمده که با استفاده از سیستم پیش‌تحکیمی، جابجایی‌های قائم تاج تونل به مقدار ۷۰٪ نسبت به حالت بدون استفاده از سیستم پیش‌تحکیمی کنترل شده است که مجددا با مقایسه این مقادیر با خطوط خطر ساکورایی، مشاهده می‌شود که این مقدار جابجایی در حد مجاز برای تونل-ها می‌باشد. همچنین با مقایسه سیستم چتری لوله‌گذاری با سیستم چتری فورپلینگ پیشنهاد شده، مشاهده می‌شود که جابجایی‌ها به مقدار حدود ۱۵٪ کاهش یافته است.

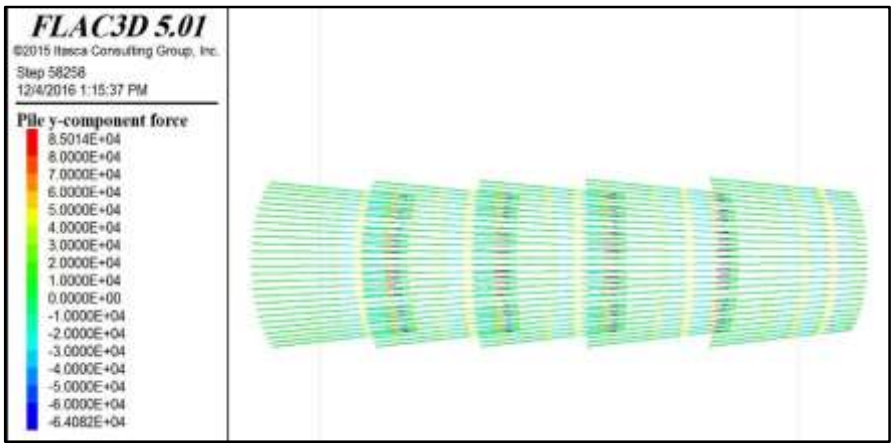
جدول ۲. پارامترهای سویلکریت (باقرزاده و گشتاسبی، ۱۳۹۱).

Mix design	g = 70% ، w/c = 50%
Elastic mudulus (MPa)	3002
uniaxial compressive strength (MPa)	18.1

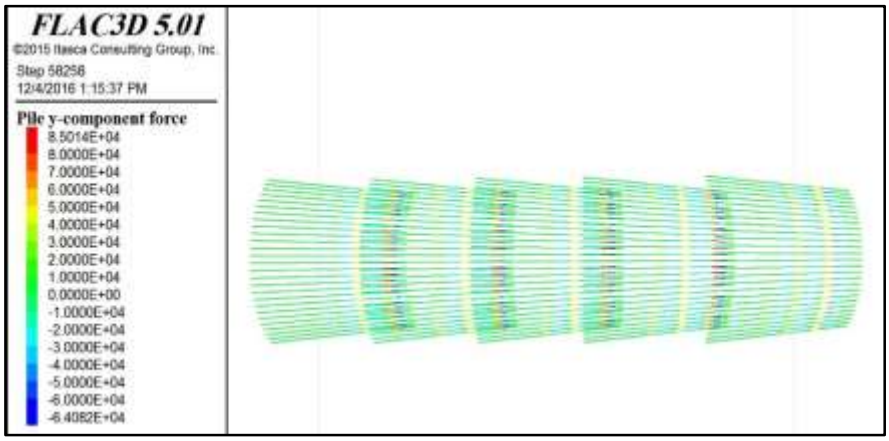


شکل۱۶. جابجایی‌های قائم پیرامون تونل در سامانه پیش‌تحکیم فورپلینگ.

در شکل ۱۷ توزیع نیرو در راستای عمودی (راستای Y در مختصات محلی لوله ها با راستای Z مختصات اصلی) لوله ها در سامانه پیش‌تحکیم فورپلینگ نشان داده شده است. شکل ۱۸ نیز نشاندهنده لنگر در لوله ها در این نوع سیستم پیش تحکیم پیشنهادی است. با توجه به این دو نمودار می توان دریافت که لوله‌ها درگیری لازم را با محیط زمین داشته و بطور فعال هستند.



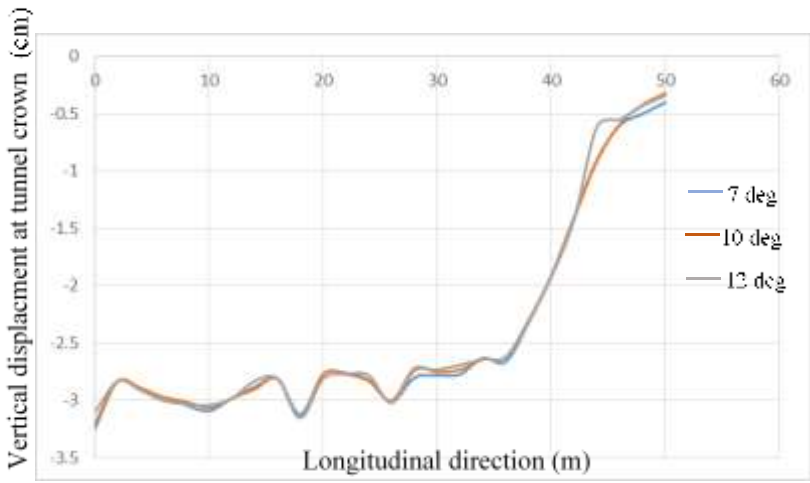
شکل ۱۷. توزیع نیروی محوری در لوله‌های قوس چتری در راستای Y در سامانه پیش‌تحکیم فورپلینگ.



شکل ۱۸. توزیع لنگر خمشی در لوله‌های قوس چتری در راستای Z در سامانه پیش‌تحکیم فورپلینگ.

۳-۵-۴. بررسی اثر تغییر زاویه قرارگیری لوله ها

همانطور که ذکر شد، در مدل ارائه شده زاویه لوله‌های فورپلینگ ۷ درجه در نظر گرفته شده است. با ثابت در نظر گرفتن بقیه‌ی عوامل، به بررسی اثر تغییر زاویه در سه حالت مختلف ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه پرداخته می‌شود. در شکل ۱۹، جابجایی های راستای قائم تاج تونل در ۳ زاویه مختلف مذکور حاصل از مدلسازی عددی قرارگیری لوله ها آورده شده است. چنانچه در نمودارهای نتایج مدلسازی پیداست، افزایش زاویه قرارگیری در سه زاویه مختلف بررسی شده، منجر به کاهش مقادیر نشست و جابجایی در حفاری مقطع بالایی شده است، ولیکن این مقدار قابل ملاحظه نیست. شکل۲۰ نیز وضعیت نقطه ابتدایی روی تاج تونل را در مراحل مختلف حفاری در زوایای مختلف مذکور قرارگیری لوله ها نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با بکارگیری لوله‌ها در زاویه‌های مختلف، فرآیند به تعادل رسیدن مدل تغییر کرده و با افزایش زاویه، تعداد گام‌های فرآیند تحلیل مدل هم کمتر می شود که این نشان دهنده ی فراهم بودن بهتر شرایط پایداری است، با این حال اختلاف قابل ملاحظه ای بین زوایای مختلف بدست نیامده است.



شکل ۱۹. جابجایی قائم تاج تونل در ۳ زاویه مختلف ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه قرارگیری لوله ها.

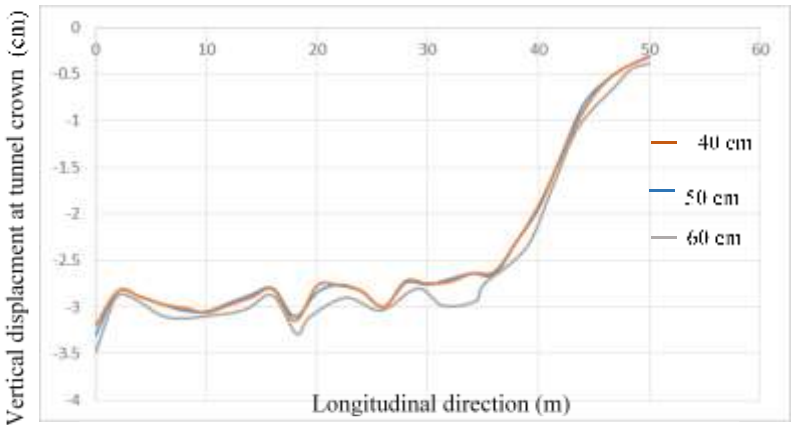
شکل ۲۰. جابجایی قائم نقطه تاج تونل در انتدای حفاری در ۳ زاویه مختلف ۷، ۱۰ و ۱۲ درجه قرارگیری لوله ها.

۴-۵-۴. بررسی اثر تغییر فاصله داری لوله ها

با توجه به اینکه در راستای عرضی قوس چتری فورپلینگ، فاصله لوله‌ها و شعاع تزریق دوغاب از پارامترهای مهم طراحی و عملکرد این نوع سیستم چتری هستند، در این بخش به بررسی این عوامل پرداخته می‌شود. البته با توجه به اینکه شعاع تزریق در این مطالعه ۴۰۰ میلی‌متر و ثابت در نظر گرفته شده است (بدلیل در دسترس نبودن اطلاعات واقعی) تغییرات فاصله‌داری لوله‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور فاصله لوله‌ها برای سه فاصله‌ی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر و تاثیر آن در تغییر جابجایی‌های قائم مورد مطالعه قرار گرفته است.

مطابق انتظار افزایش فاصله‌داری لوله‌ها از ۴۰ به ۶۰ سانتی‌متر موجب افزایش جابجایی قائم تاج تونل می‌شود. این میزان افزایش برابر با ۸,۵٪ برای جابجایی قائم تاج تونل می‌باشد. شکل ۲۱ بیانگر تاثیر فاصله‌داری بر روی جابجایی‌های قائم می‌باشد. شکل ۲۲ نیز وضعیت نقطه ابتدایی روی تاج تونل را در گام‌های مختلف تحلیل مدل در حالتی که فاصله‌داری لوله‌ها تغییر می‌کند را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، تغییر فاصله‌داری لوله‌ها، بر شرایط به تعادل رسیدن گام‌های مدل موثر بوده و در تعادل کلی نقطه ابتدایی روی تاج تونل تغییراتی به وجود می‌آورد.

با توجه به مطالب ذکر شده، سیستم چتری فورپلینگ با خصوصیات شامل : قطر لوله : ۹۰ میلی‌متر، ضخامت جداره: ۷/۲ میلی‌متر، طول لوله‌ها : ۱۲ متر، طول همپوشانی : ۳ متر، زاویه قرارگیری نسبت به افق : ۱۰ تا ۱۲ درجه و فاصله‌ی بین لوله‌ها : ۶۰۰ میلی‌متر پیشنهاد می‌شود.



شکل ۲۱. جابجایی قائم تاج تونل در فاصله داری متفاوت لوله ها در زاویه ۱۰ درجه قرارگیری لوله ها.

شکل ۲۱. جابجایی قائم نقطه روی تاج تونل در فاصله داری متفاوت لوله ها در زاویه ۱۰ درجه قرارگیری لوله ها.

۵. نتیجه‌گیری

بر اساس تحقیق صورت گرفته اهم نتایج بدست آمده به شرح ذیل است:

- با توجه به مدلسازی های انجام شده در مطالعه موردی و بررسی جابجایی‌های صورت گرفته در تاج تونل و با مقایسه‌ی آنها با سطوح خطر ساکورایی، استفاده از سیستم پیش‌تحکیمی در تامین پایداری تونل برای ناحیه مورد بررسی لازم است.
- استفاده از سیستم میله‌گذاری به عنوان پیشنهاد طرح اولیه مهندسی مشاور بوده و استفاده از این سیستم جابجایی تاج را به مقدار ۶۰٪ نسبت به حالت بدون استفاده از سیستم پیش‌تحکیمی کاهش داده است. همچنین استفاده از میل مهارها به همراه سیستم پیش‌تحکیمی لوله گذاری طرح نهایی، به میزان حدود ۷۰٪ از جابجایی قائم تاج تونل

نسبت به حالتی که از سیستم پیش‌تحکیم استفاده نشده است، می‌کاهد.

- استفاده از طرح پیشنهادی توسط مشاور طرح، کارایی لازم را برای پایداری و کاهش جابجایی تاج تونل در حد مجاز را دارد.
- در کارگیری از سیستم چتری فورپلینگ، افزایش زاویه‌ی لوله‌های فورپلینگ باعث افزایش پایداری می‌شود، که البته میزان افزایش مقدار زیادی نیست. اما از آنجا که در این روش قرارگیری زاویه‌دار لوله ها تنها به منظور ایجاد فضای لازم برای نصب سری بعدی لوله‌هاست، لازم است این زاویه با توجه به نیاز پروژه و قابلیت دستگاه‌های حفاری موجود در نظر گرفته شود.
- افزایش فاصله‌ی بین لوله‌های فورپلینگ منجر به افزایش نشست و به تبع کاهش پایداری تونل می‌شود، با این حال با توجه به هزینه‌های زیاد این روش، هرچه تعداد حفاری و نصب و اجرای لوله‌ها کمتر باشد، مقرون به صرفه‌تر است. بنابراین لازم است فاصله‌ای که از لحاظ اجرایی و هزینه‌ها بهینه باشد، در نظر گرفته شود.
- استفاده از روش لوله‌گذاری فورپلینگ در محدوده پیشنهادی کارایی مورد نظر را داشته و به میزان حدود ۷۰٪ از جابجایی تاج تونل می‌کاهد.

منابع

باقرزاده، پریسا؛ گشتاسبی، کامران؛ ۱۳۹۳. مدل‌سازی و بررسی عملکرد روش چتری در تونل راه‌آهن قزوین-رشت-انزلی، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۹، شماره ۲۴، ۵۶-۴۵.

جنرال مکانیک -مهندسین مشاور لانیز، ۱۳۹۳. گزارش‌های زمین شناسی مهندسی و مهندسی تونل البرز، تهران، ایران.

Aksoy, C. O. and Onargan, T., 2010. The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages. Tunnelling and underground space technology. Elsevier, 25(5), pp. 553–559.

Elyasi, A., Javadi, M., Moradi, T., Moharrami, J., Parnian, S. and Amrac, M., 2016. Numerical modeling of an umbrella arch as a pre-support system in difficult geological conditions: a case study. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75(1), pp.211-221.

Hefney, A. M., W. L. Tan, P. Ranjith, J. Sharma, and J. Zhao., 2004. Numerical analysis for umbrella arch method in shallow large scale excavation in weak rock. In TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY. PROCEEDINGS OF THE 30TH ITA-AITES WORLD TUNNEL CONGRESS SINGAPORE, 22-27 MAY, vol. 19, no. 4-5.

Muraki, Y., 1997. The umbrella method in tunnelling. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology. See also URL https://dspace.mit.edu.

Ocak, I., 2008. Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro. Tunnelling and Underground Space Technology. Elsevier, 23(6), pp. 674–681.

Oke, J., Vlachopoulos, N. and Diederichs, M. S., 2014. "Numerical analyses in the design of umbrella arch systems". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Elsevier, 6(6), pp. 546–564.

Schumacher, F. P., 2012. Numerical Investigation of Pipe Umbrella Roof Support Systems in Underground Coal Mining. A Thesis for Degree of Master of Science, Department of Mining Engineering, University of Utah. See also URL collections.lib.utah.edu.

Shin, J.H., Choi, Y.K., Kwon, O.Y. and Lee, S.D., 2008. Model testing for pipe-reinforced tunnel heading in a granular soil. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(3), pp.241-250.

Sakurai, S, 1997. Strength parameters of rocks determined from back analysis of measured displacements, Proceedings of the First Asian Rock Mechanics Symposium, International Society for Rock Mechanics, Lisbon.

Sakurai, S., Kawashima, I. and Otani, T., 1993. A criterion for assessing the stability of tunnels, in ISRM International Symposium-EUROCK 93. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Volkmann, Gu., Button, E. and Schubert, W., 2006. A contribution to the design of tunnels supported by a pipe roof, The 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.

Volkmann, G. M. and Schubert, W., 2007. Geotechnical model for pipe roof supports in tunneling. Conference Underground Space–the 4th Dimension of Metropolises, Barták, Hrdina, Romancov & Zlámal (eds), Taylor & Francis Group, London.

Volkmann, G. M. and Schubert, W., 2006. Contribution to the design of tunnels with pipe roof support. Asian Rock Mechanics Symposium. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., p. 125.

Zarei, H., Moarefvand, P. and Salmi, E. F., 2019. Numerical modeling of umbrella arch technique to reduce tunnelling induced ground movements. Environmental Earth Sciences. Springer, 78(10), p. 291.