

## مدل سازی عددی جابه جایی خاک و نشست سطح زمین حین پیشروی گام های حفاری در روش جدید تونل سازی اتریشی

ستار مهدوری<sup>۱\*</sup>؛ محمدمهدی چهره پاک<sup>۲</sup>

۱- استادیار، عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.  
۲- کارشناسی ارشد تونل و فضاهای زیرزمینی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

(\* نویسنده مسئول: [satar.mahdevari@aut.ac.ir](mailto:satar.mahdevari@aut.ac.ir))

### چکیده

امروزه با گسترش محدوده کلان شهرها و افزایش جمعیت، حجم ترافیک درون شهری نیز رو به افزایش است. توسعه شبکه های ارتباطی زیرزمینی مانند تونل های زیرگذر و مترو به علت عدم تداخل با رفت و آمد شهروندان مناسب ترین گزینه برای حل معضلات ترافیکی در کلان شهرها است. در این خصوص روش جدید تونل سازی اتریشی (ناتم) بهترین گزینه برای حفاری تونل در مناطق کم عمق شهری و در مسافت های کوتاه است. برای اجرای موفق روش حفاری ناتم در محیط های کم عمق شهری، برآورد و کنترل جابه جایی های سقف، کف و پیرامون تونل و به تبع آن نشست سطح زمین در هر مرحله از حفاری بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق، برای تخمین نشست سطح زمین در قطعه  $T3$  تونل زیرگذر امیرکبیر در شرق تهران، از مدل سازی عددی در محیط نرم افزار پلکسیس استفاده شده است. در مدل عددی مدل رفتاری خاک سخت شونده (الاستوپلاستیک کامل) برای توده خاک اطراف تونل و مدل رفتاری الاستیک برای سیستم نگهداری شاتکریت (سیستم نگهداری اولیه تونل) و دیواره میانی تونل لحاظ شده است. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، پس از پایان مرحله نهم حفاری حداکثر مقدار جابه جایی کل ۵۴ میلی متر، جابه جایی قائم سقف ۵۳ میلی متر و آماس کف تونل ۴۲ میلی متر به دست آمده است. بیشترین میزان جابه جایی ها مربوط به ناپایداری سقف و بالا زدگی ها کف تونل ناشی از افزایش تنش های افقی در اعماق کم می باشد. همچنین بیشترین میزان نشست سطح زمین در پایان نهم مرحله حفاری حدود ۵۲ میلی متر برآورد شده است و گودی نشست نیز در محدوده ۲ تا ۵ متری از دیواره میانی تونل در سطح زمین تشکیل شده است و به تدریج با پیشروی سینه کار به تعادل خواهد رسید. لذا کنترل جابه جایی خاک روباره در سه مرحله پایانی برای حفاری گالری میانی تونل نقش اصلی را در کنترل نشست سطح زمین خواهد داشت.

نشست سطح زمین، جابه جایی خاک، روش عددی المان محدود، روش جدید تونل سازی اتریشی، تونل زیرگذر امیرکبیر.

### واژگان کلیدی

### ۱- مقدمه

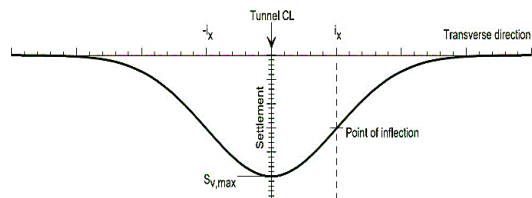
راه سازی، سد سازی، استخراج معادن زیرزمینی، متروها و زیرگذرهای ترافیکی در مناطق پر ازدحام شهری شده است [۱]. حفاری تونل های شهری علاوه بر تأثیر مستقیم بر کاهش

گسترش روزافزون دانش تونل سازی منجر به کاربرد روزافزون حفاری تونل در صنایع مختلف از قبیل شبکه های انتقال آب،

برخی از مزایای کاربرد روش ناتم برای حفاری تونل عبارتند از: عدم نیاز به ماشین‌آلات خاص، امکان اجرای مقطع تونل با هر شکل هندسی، تقسیم عملیات حفاری و افزایش تعداد جبهه‌کار برای بالا بردن سرعت حفاری تونل، قابلیت انعطاف‌پذیری برای نصب سیستم نگهداری با توجه به شرایط زمین، عدم نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه زیاد، توزیع یکنواخت تنش، کنترل ایمنی سازه تونل و انعطاف‌پذیری در اجرای ترتیب مراحل حفاری [۷]، [۸].

در خصوص برآورد میزان نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل، پژوهش‌های گسترده‌ای با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی، مدل‌های فیزیکی، هوش مصنوعی و عددی در مقیاس آزمایشگاهی و میدانی انجام شده است [۹].

روش‌های تجربی علی‌رغم سهولت کاربرد، قادر به ارائه راه‌حل دقیق و فراگیر برای شرایط مختلف زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی نیستند [۱۰]. در واقع این روش‌ها با بهره‌گیری از ضریب‌های تجربی، امکان بررسی توزیع نشست سطح زمین را فراهم می‌کنند. منحنی گوس یکی از معروف‌ترین نمودارهای مورد استفاده در روش‌های تجربی است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، منحنی گوس دارای دو پارامتر مهم شامل حداکثر نشست سطح زمین در بالای محور تونل ( $\delta_{max}$ ) و فاصله سطح تا نقطه عطف منحنی نشست ( $i$ ) است که برای توصیف نمودار نشست سطح زمین در اثر حفاری یک تونل منفرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای برآورد میزان نشست سطح زمین روابط تجربی متعددی ارائه شده است، ولی روش‌های تجربی از نظر دقت محاسبات، اعمال شرایط واقعی، محاسبه جابه‌جایی‌ها و پیش‌بینی منحنی نشست کاستی‌هایی دارند [۱۱]. به طور کلی روابط تجربی برای طراحی تونل‌ها بر اساس تجارب حاصل از پروژه‌های مختلف توسعه داده شده‌اند و علی‌رغم دقت مناسب برای برآورد اولیه نشست، یک راهکار جامع برای کاربرد در شرایط مختلف ارائه نمی‌دهند [۱۲].



شکل ۱- منحنی گوس برای برآورد نشست سطح زمین [۱۳]

بار ترافیکی، موجب تسریع در حمل‌ونقل شهری، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، کاهش مسافت و افزایش ایمنی شهروندان می‌شود. از این رو تونل‌سازی همیشه به عنوان یک راهکار مناسب برای کاهش معضل ترافیک در کلان‌شهرها مورد توجه است [۲].

حفاری تونل در محیط‌های شهری به ویژه در اعماق کم و در زمین‌های آبرفتی منجر به ایجاد جابه‌جایی‌های افقی و قائم در محدوده پیرامون تونل می‌شود. در صورت عدم کنترل این جابه‌جایی‌ها و به تبع آن نشست سطح زمین، پایداری تونل و سازه‌های سطحی و زیرزمینی مجاور تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. بنابراین تخمین میزان نشست سطح زمین در اثر حفر تونل در اعماق کم و لایه‌های خاکی به خصوص در محیط‌های شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳].

به طور طبیعی پس از حفاری تونل یا هر سازه زیرزمینی دیگر شرایط تعادل زمین دچار اغتشاش شده و زمین برای رسیدن به تعادل مجدد متحمل جابه‌جایی و تغییرشکل می‌شود. این جابه‌جایی‌ها بسته به شرایط هندسی، شرایط زمین‌شناسی و شرایط ژئومکانیکی ممکن است به صورت نشست در سطح زمین آشکار شوند. در ارزیابی نشست سطح زمین بر اثر حفاری تونل عوامل مختلفی از جمله روش حفاری، زمان و نحوه نصب سیستم نگهداری، هندسه مقطع و طول تونل، ارتفاع روباره تونل، شرایط اولیه تنش‌های برجا و خصوصیات ژئومکانیکی محیط پیرامون تونل مؤثر هستند [۴]، [۵]. از این رو با مدل‌سازی و تخمین نشست سطح زمین می‌توان تدابیر پیشگیرانه و به‌هنگام برای کنترل جابه‌جایی‌ها و نشست زمین اتخاذ کرد.

روش جدید تونل‌سازی اتریشی<sup>۱</sup> (ناتم) یکی از روش‌های حفاری مرحله‌ای تونل است که مبتنی بر اصولی همچون رفتارنگاری زمین، پایش پایداری تونل و کنترل کف تونل است. در تئوری این روش منحنی اندرکنش زمین برای تعیین ارتباط بین تنش‌ها و تغییرشکل‌های اطراف تونل به عنوان یک اصل آورده شده است [۶]. به طور کلی روش حفاری ناتم شامل ترکیبی از روش‌های حفاری و پایدارسازی تونل است. ویژگی اصلی این روش، پایش و رفتارسنجی مداوم جابه‌جایی‌های زمین و بازنگری پایداری سیستم نگهداری برای دستیابی به اقتصادی‌ترین و پایدارترین سیستم نگهداری است.

<sup>1</sup> New Austrian Tunneling Method (NATM)

محیط پیوسته و محیط ناپیوسته تقسیم می‌شوند. روش‌های المان محدود، تفاضل محدود و المان مرزی مخصوص محیط‌های پیوسته و روش المان مجزا مناسب محیط‌های ناپیوسته هستند. برای شرایط پیچیده می‌توان از روش‌های ترکیبی هم استفاده کرد که نیازمند رایانه‌هایی با پردازنده قوی و حافظه با ظرفیت بالا می‌باشد. به طور کلی مدل‌سازی با استفاده از روش‌های عددی در اکثر مواقع کاربردی و قابل‌اعتماد بوده و نتایج دقیقی ارائه می‌دهد.

روش حفاری ناتم برای حفاری تونل‌های کم‌عمق در شرایطی که ضخامت روباره تونل کافی باشد، مناسب‌ترین گزینه است. به علت کاربرد زیاد روش ناتم برای حفاری تونل‌های کم‌عمق و عمیق تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است که برای نمونه می‌توان به بررسی پایداری سینه‌کار حفاری با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی [۲۲]، مدل‌سازی عددی تأثیر مراحل حفاری بر روی رفتار زمین [۲۳]، ارائه یک رابطه تجربی بر اساس مدل‌سازی عددی به منظور پیش‌بینی نشست حاصل از حفاری تونل به روش ناتم [۲۴]، بررسی تأثیر سیستم پیش‌نگهدارنده تیر پیشرو بر روی حداکثر نشست سطح زمین در روش حفاری ناتم [۲۵]، مقایسه نتایج تحلیل پایداری تونل‌های عمیق در حالت دو بعدی و سه بعدی با استفاده از مدل‌سازی عددی المان محدود [۲۶]، مدل‌سازی عددی رفتار دینامیکی خاک در روش حفاری ناتم [۲۷]، ارزیابی ضخامت ناحیه تأثیر (آسیب) و همگرایی تونل [۲۸] و مدل‌سازی عددی به منظور تخمین نشست سطح زمین ناشی از تونل‌سازی به روش حفاری مرحله‌ای در زمین‌های نرم [۲۹] اشاره کرد.

در تحقیق حاضر با استفاده از روش عددی المان محدود و در محیط نرم‌افزار پلکسیس میزان نشست سطح زمین در اثر حفاری قطعه T3 تونل زیرگذر امیرکبیر تهران برآورد شده است. این تونل به روش ناتم حفاری شده است. بنابراین با مدل‌سازی مراحل مختلف حفاری تونل، منحنی جابه‌جایی و حداکثر نشست سطح زمین در هر مرحله برآورد شده است.

در روش‌های تحلیلی که بر اساس تئوری الاستیسیته ارائه شده‌اند، پارامترهای مؤثر عمدتاً شامل نسبت پواسون، عمق حفاری و قطر تونل می‌باشند. متداول‌ترین روش‌های تحلیلی برای برآورد میزان نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل عبارتند از: راه‌حل فرم بسته ساگاستا<sup>۲</sup> [۱۴]، راه‌حل تحلیلی ورویجت و بوکر<sup>۳</sup> برای محاسبه تغییرشکل‌های پیرامون تونل در خاک‌های الاستیک تراکم‌ناپذیر [۱۵] و راه‌حل تحلیلی لوگاناتان و پولوس<sup>۴</sup> [۱۶]. روش‌های تحلیلی نتایج قابل‌قبولی به ویژه در محیط‌های سنگی ارائه می‌دهند ولی در شرایط متغیر ژئومکانیکی زمین و در حین حفاری مرحله‌ای دقت کمی دارند [۱۶].

مدل‌های فیزیکی که امروزه به ندرت توسط محققین برای مقایسه نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیز بر اساس شبیه‌سازی شرایط واقعی در مقیاس کوچک استوار هستند [۱۷]، [۱۸].

در روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل‌ها بر اساس مجموعه‌ای از پارامترهای هندسی، ژئوتکنیکی و رفتارنگاری توده‌سنگ یا خاک اطراف تونل پیش‌بینی می‌شود [۱۹]، [۲۰].

امروزه با گسترش سیستم‌های رایانه‌ای و توسعه نرم‌افزارهای مهندسی، علاوه بر رفع اکثر محدودیت‌های روش‌های تجربی و تحلیلی، امکان مدل‌سازی عددی و تحلیل پیچیده‌ترین سازه‌های زیرزمینی وجود دارد [۲۱]. نرم‌افزارهای مبتنی بر روش‌های عددی با پیشرفت چشمگیر قادر به مدل‌سازی تونل‌ها با هندسه پیچیده، شبیه‌سازی شرایط واقعی سازه، لحاظ پارامترهای ژئومکانیکی و پارامترهای مکانیکی سیستم نگهداری هستند. همچنین روش‌های عددی از دقت بسیار بالایی برای محاسبه جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها برخوردارند.

مشخصه اصلی روش‌های عددی ساده‌سازی و تقسیم یک سازه بزرگ به المان‌های نسبتاً کوچک است. سپس برای هر کدام از المان‌های منفرد یک معادله مشخصه تعریف می‌شود که به طور همزمان و به صورت اندرکنشی حل می‌شوند. نتایج حاصل از حل این مجموعه معادلات نشان‌دهنده وضعیت توزیع تنش و جابه‌جایی در داخل سازه می‌باشد.

روش‌های عددی بر اساس نوع محیط مدل‌سازی به دو دسته

<sup>4</sup> Loganathan-Poulos

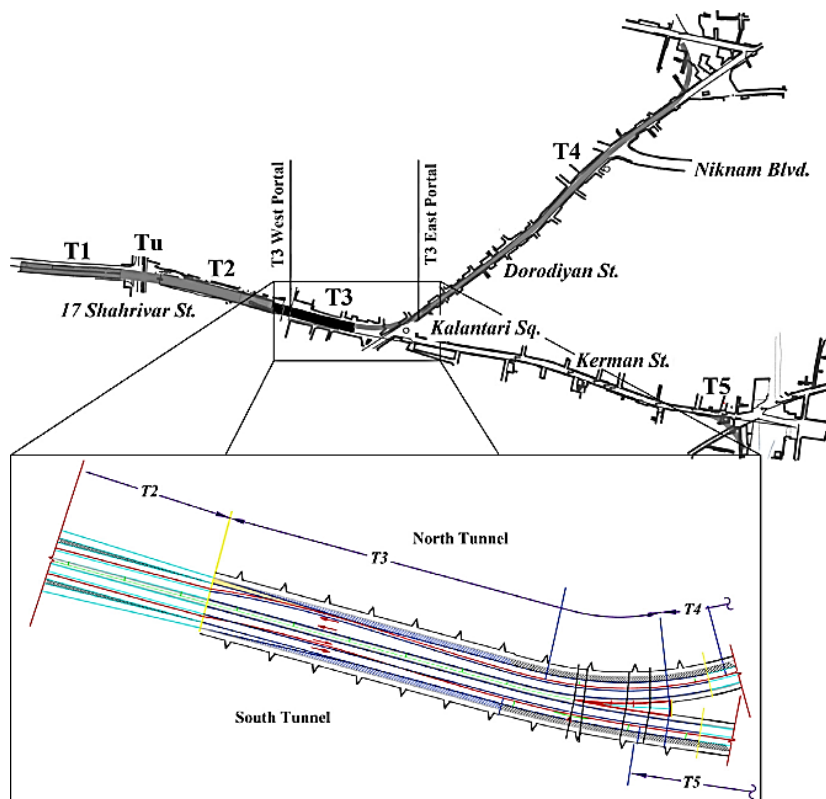
<sup>2</sup> Sagaseta

<sup>3</sup> Verruijt-Booker

## ۲- تونل زیرگذر امیرکبیر

تونل زیرگذر امیرکبیر با طول تقریبی ۲۳۵۰ متر در شهر تهران بین خیابان ۱۷ شهریور و بزرگراه امام علی (ع) واقع شده است. این تونل بزرگراه امام علی (ع) را به مرکز شهر و بازار تهران متصل می‌کند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، این تونل از شش قطعه با مقاطع مختلف شامل قطعه T1 بین خیابان ۱۷ شهریور و بازار تهران به طول ۱۹۷ متر،

تونل دوقلو TU در زیر خیابان ۱۷ شهریور به طول تقریبی ۶۹ متر، قطعه T2 بین خیابان‌های ۱۷ شهریور و شکوفه به طول ۲۲۰ متر، قطعه T3 با طول تقریبی ۱۷۰ متر از زیر خیابان شکوفه تا میدان کلانتری به صورت یک تونل دودخانه به عرض ۲۷ متر، قطعه T4 با طول ۸۸۶ متر از میدان کلانتری تا اتوبان امام علی (ع) در امتداد خیابان درودیان و قطعه T5 با طول ۸۰۸ متر در خیابان کرمان تشکیل شده است [۳۰].



شکل ۲- پلان و موقعیت جغرافیایی تونل زیرگذر امیرکبیر [۳۰]

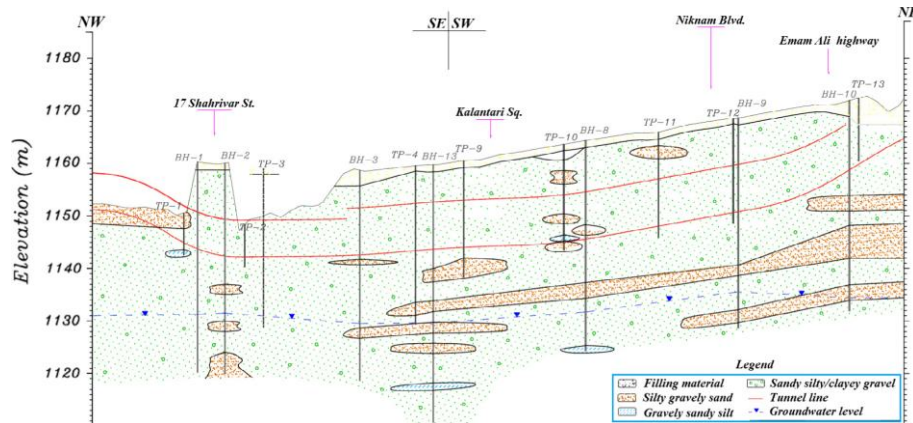
سازند دربرگیرنده تونل امیرکبیر در نتیجه تراکم و سیمانی شدن، صلبیت زیادی دارد؛ با این حال نفوذپذیری آن نیز زیاد است [۳۱].

در این تحقیق قطعه T3 به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، قطعه T3 تونل امیرکبیر دارای عرض ۲۷ متر و طول ۱۷۰ متر است. ارتفاع این تونل به علت نعل اسبی بودن متغیر است و بیشترین ارتفاع در مرکز تقریباً به ۱۲ متر می‌رسد. فاصله سطح زمین تا تاج تونل که بیانگر ضخامت روباره است، حدود ۱۱ متر و

از نظر زمین‌شناسی کلان‌شهر تهران بر روی یک سری از سازندهای جوان آبرفتی قرار گرفته است که از کوهپایه‌های البرز تا حاشیه جنوبی کویر تهران گسترش دارند. این سازندهای آبرفتی حاصل فعالیت رودخانه‌های فصلی و مسیل سیلاب‌های کوه‌های البرز هستند.

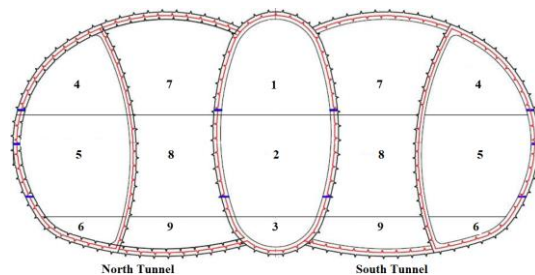
همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، این سازند شامل کنگلومراهای همگن متشکل از شن و ریگ‌های آواری بوده که ماتریسی با اندازه لای و ماسه دارد و شامل شن ماسه‌ای و ماسه‌های متراکم به همراه ۵ تا ۳۰ درصد سیلت و رس است.

سطح آب زیرزمینی در عمق ۲۵ تا ۳۰ متری از سطح زمین قرار گرفته است [۳۲].



شکل ۳- نیم‌رخ زمین‌شناسی مسیر عبور تونل امیر کبیر [۳۰]

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نحوه مش‌بندی در پیرامون تونل به صورت شبکه مثلثی ریز انتخاب شده است که ابعاد مش‌ها با دور شدن از محدوده تونل به سمت مرز مدل به تدریج افزایش می‌یابد. به این ترتیب هم‌زمان با کاهش حجم و زمان محاسبات، دقت نتایج نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به متقارن بودن مقطع تونل، نیمی از مقطع با هدف کاهش حجم و زمان محاسبات، در نظر گرفته شده است.

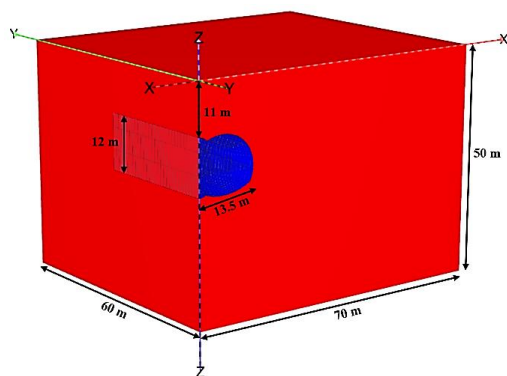


شکل ۴- ترتیب مراحل حفاری تونل امیر کبیر [۳۰]

### ۳- فرآیند مدل‌سازی

#### ۳-۱- هندسه مدل

اولین گام در مدل‌سازی عددی تعیین ابعاد مدل و پیاده‌سازی هندسه تونل در نرم‌افزار است. ابعاد مدل بر اساس اصل سنت ونانت<sup>۵</sup> در جهت محور  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  به ترتیب ۷۰، ۶۰ و ۵۰ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۵). شرایط اولیه و شرایط مرزی نیز بر اساس شرایط واقعی شبیه‌سازی شده است. تنش‌های برجا بر اساس عمق و وزن مخصوص لایه‌های روبراه به مدل اعمال شده است. به علت پایین بودن سطح ایستایی از تأثیر آب‌های زیرزمینی صرف‌نظر شده است. مرزهای جانبی مدل نسبت به جابه‌جایی افقی و کف مدل نسبت به جابه‌جایی افقی و قائم ثابت شده است. برای مدل‌سازی از مدل کرنش صفحه‌ای با المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌ای استفاده شده است.



شکل ۵- ابعاد هندسی مدل عددی

<sup>5</sup> Saint-Venant's principle

( $E_{ur}$ ) و مدول مماسی در مرحله اول بارگذاری تحکیمی یا مدول ادنومتري ( $E_{oed}$ ) توصیف می‌شود [۳۵]. در شکل ۷ این مدول‌ها بر روی منحنی تنش-کرنش هایپربولیک نشان داده شده‌اند. در این صورت تابع تسلیم سخت‌شونده در حالت برشی ( $f_1$ ) بر اساس تقریب هایپربولیک رابطه بین کرنش محوری ( $\epsilon_1$ ) و تنش انحرافی ( $q$ ) در آزمون فشاری سه‌محوری زهکشی شده استاندارد به دست می‌آید [۳۵]:

$$f_1 = \frac{q_a}{E_{50}} \frac{q}{q_a - q} - 2 \frac{q}{E_{ur}} - \zeta^{PS}, \quad (1)$$

for  $q < q_f$

که در آن  $E_{50}$  مدول تغییرشکل به ازای ۵۰ درصد تنش انحرافی حداکثر،  $\zeta^{PS}$  پارامتر کرنش پلاستیک سخت‌شونده و  $q_a$  تنش انحرافی مجانب که با استفاده از تنش انحرافی نهایی ( $q_f$ ) و نسبت شکست ( $R_f$ ) تعریف می‌شود [۳۵]:

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (2)$$

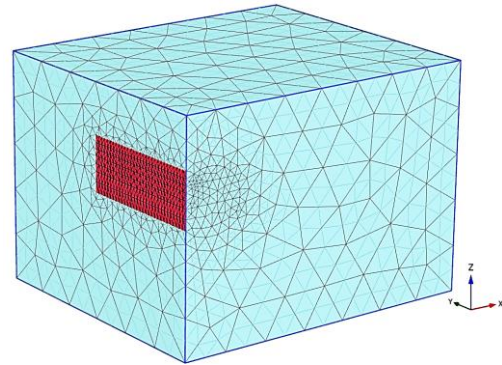
برای اکثر خاک‌ها  $R_f$  بین ۰/۷۵ تا ۱ متغیر است و مقدار بهینه آن ۰/۹ می‌باشد. اگر  $R_f = 1$  باشد، شرایط تسلیم پلاستیک کامل برقرار می‌شود. این شرایط در حالتی اتفاق می‌افتد که رفتار تنش-کرنش از ابتدای مسیر غیرخطی باشد. بنابراین می‌توان  $q_f$  را بر اساس معیار موهر-کولمب به صورت زیر نوشت [۳۵]:

$$q_f = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} (\sigma_3 + C \cot \phi) \quad (3)$$

که در آن  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک،  $\sigma_3$  تنش حداقل در آزمون سه‌محوری و  $C$  چسبندگی مؤثر خاک می‌باشد. به این ترتیب مدول سکانتی  $E_{50}$  که با ۵۰ درصد مقدار  $q_f$  متناظر است، به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود [۳۵]:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{C \cot \phi + \sigma_3^*}{C \cot \phi + \sigma^{ref}} \right)^m \quad (4)$$

که در آن  $\sigma_3^* = \max(\sigma_3, \sigma_L)$  حد تنش حداقل که معمولاً معادل ۱۰ کیلوپاسکال فرض می‌شود) و  $\sigma^{ref}$  تنش حداقل که در این تنش  $E_{50}^{ref}$  تعیین می‌شود. در  $\sigma^{ref}$  برای آزمایش سه‌محوری با  $\sigma_3$  متناظر است. توان  $m$  هم برای خاک‌ها بین ۰/۳ تا ۱ متغیر است. در واقع  $E_{50}$  کرنش‌های پلاستیک که به مکانیزم تسلیم برشی مرتبط هستند، را کنترل می‌کند.



شکل ۶- نحوه مش‌بندی مدل عددی

### ۳-۲- مدل رفتاری و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک

برای مدل‌سازی مراحل حفاری به روش ناتم در تونل امیرکبیر، با توجه به ماهیت خاک محدوده تونل از مدل رفتاری خاک سخت‌شونده به عنوان معیار تسلیم خاک استفاده شده است. ویژگی بارز این مدل رفتاری، مدل‌سازی بهتر بالازدگی کف در تونل‌های کم‌عمق است؛ به طوری که در برابر بالازدگی کف تونل مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. مدل خاک سخت‌شونده بر خلاف مدل موهر-کولمب که رفتار الاستیک-پلاستیک دارد، بر پایه پلاستیسیته سخت‌شونده توسعه داده شده است. بنابراین مدل خاک سخت‌شونده، شرایط ژئوتکنیکی خاک را با دقت بیشتری توصیف می‌کند؛ زیرا این مدل رفتاری یکی از مدل‌هایی است که بر مبنای مکانیک خاک حالت بحرانی توسعه داده شده است و شامل دو حالت استاندارد و کرنش‌های کوچک است [۳۳]. در مدل خاک سخت‌شونده، کرنش کلی بر اساس مقدار تنش وابسته به صلیبیت محاسبه می‌شود که در حالت بارگذاری و باربرداری متفاوت است [۳۴]. از مدل خاک سخت‌شونده می‌توان برای بررسی رفتار سیلت‌های رسی، خاک‌های شنی و ماسه‌ای و خاک‌های رسی با نسبت پیش‌تحکیمی پایین استفاده کرد. در شرایط باربرداری و بارگذاری مجدد خاک، مدل خاک سخت‌شونده مناسب‌ترین مدل رفتاری برای توصیف خاک است [۳۵].

در مدل خاک سخت‌شونده مشابه مدل موهر-کولمب حالت تنش حدی با استفاده از پارامترهای چسبندگی ( $C$ )، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و زاویه اتساع ( $\psi$ ) بیان می‌شود ولی وضعیت خاک پیش از گسیختگی به وسیله سه پارامتر مدول سکانتی در نصف مقاومت نهایی آزمایش سه‌محوری زهکشی شده استاندارد ( $E_{50}$ )، مدول باربرداری-بارگذاری مجدد

عملیات اجرایی تونل امیرکبیر شامل حفاری تونل، نصب سیستم نگهداری موقت، زهکشی، عایق‌بندی و نصب سیستم نگهداری نهایی می‌باشد. در مدل‌سازی عددی حفاری تونل در نُه مرحله مطابق شکل ۴ و در ۳۰ گام حفاری یک متری انجام شده است تا تغییر شکل آنی پس از نصب سیستم نگهداری ایجاد نشود. برای حفاری تونل، در ابتدا به ترتیب سه بخش فوقانی، میانی و زیرین گالری مرکزی حفاری می‌شوند. پس از حفاری گام‌های یک متری در هر سیکل، سیستم نگهداری شانکریت برای تحکیم اولیه هر بخش و سپس سیستم نگهداری بتنی به همراه لیتیس‌گیردر مجموعاً به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر نصب می‌شود.

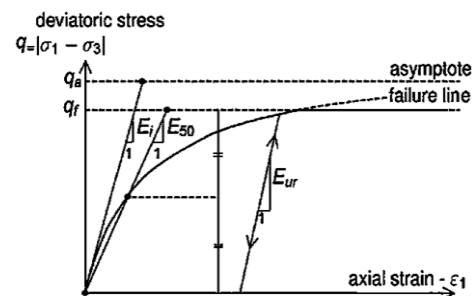
همچنین در این تونل از یک دیوار یا دیواره بتنی مسلح به ضخامت ۸۰ سانتی‌متر برای تقویت سیستم نگهداری و پایداری تونل استفاده شده است. این دیواره علاوه بر پایداری تونل، مسیر رفت و برگشت را نیز تفکیک می‌کند. پس از نصب دیوار میانی و حفاری کل مقطع تونل، سیستم نگهداری نهایی در دو مرحله شامل بتن‌ریزی در کف تونل (دال کف‌بند) و نصب لیتیس‌گیردر به همراه بتن‌ریزی در دیواره‌ها و سقف به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر انجام می‌شود. به این ترتیب پس از حفاری گالری مرکزی تونل، یک دیوار میانی با ضخامت ۸۰ سانتی‌متر در مدل عددی ایجاد می‌شود. سپس در مراحل بعدی مطابق شکل ۴ گالری‌های میانی و جانبی تونل حفاری شده و در نهایت سیستم نگهداری دائمی تونل نصب خواهد شد. پارامترهای مکانیکی سیستم نگهداری در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی سیستم نگهداری [۳۱]

| پارامتر         | واحد              | دیواره               | شانکریت              |
|-----------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| چگالی           | kN/m <sup>3</sup> | ۲۵                   | ۲۵                   |
| مدول الاستیسیته | GPa               | ۲۸                   | ۲۴                   |
| ممان اینرسی     | m <sup>4</sup>    | ۲/۸×۱۰ <sup>-۴</sup> | ۲/۸×۱۰ <sup>-۴</sup> |
| نسبت پواسون     | -                 | ۰/۲                  | ۰/۲۲                 |

#### ۴- نتایج مدل‌سازی عددی

پس از تعریف هندسه مدل و اعمال شرایط اولیه و شرایط



شکل ۷- انواع مدول در شرایط آزمون سه محوره زهکشی شده [۳۵]

همچنین مدول بارگذاری-باربرداری اولیه  $E_{ur}$  در بردارنده مقادیر کرنش الاستیک و پلاستیک است و رفتار خاک را تحت شرایط بارگذاری و باربرداری توصیف می‌کند [۳۵]:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{C \cot \phi + \sigma_3^*}{C \cot \phi + \sigma^{ref}} \right)^m \quad (5)$$

که در آن  $E_{ur}^{ref}$  مدول صلبیت به ازای  $\sigma^{ref}$  است. مدول ادئومتری برای تعیین کرنش‌های پلاستیک ناشی از بارگذاری اولیه استفاده می‌شود.

به این ترتیب سه مدول تغییر شکل به همراه  $C$ ،  $\phi$ ،  $\nu$  و  $\psi$  و  $m$  هشت مولفه اصلی مدل رفتاری خاک سخت‌شونده هستند. مقدار میانگین پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های تشکیل‌دهنده خاک در پیرامون تونل امیرکبیر در جدول ۱ خلاصه شده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای ژئومکانیکی محدوده تونل [۳۰]

| پارامتر                                 | واحد              | مقدار |
|---|-------------------|-------|
| وزن مخصوص اشباع ( $\gamma_{sat}$ )      | kN/m <sup>3</sup> | ۲۱    |
| وزن مخصوص غیراشباع ( $\gamma_{unsat}$ ) | kN/m <sup>3</sup> | ۲۰    |
| $E_{ur}$                                | MPa               | ۹۹    |
| $E_{50}$                                | MPa               | ۳۳    |
| $E_{oed}$                               | MPa               | ۳۳    |
| زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )           | Deg               | ۳۵    |
| چسبندگی ( $C$ )                         | kN/m <sup>2</sup> | ۲۰    |
| نسبت پواسون ( $\nu$ )                   | -                 | ۰/۳   |
| زاویه اتساع ( $\psi$ )                  | Deg               | ۵     |
| پارامتر سختی وابسته به تنش ( $m$ )      | -                 | ۰/۵   |

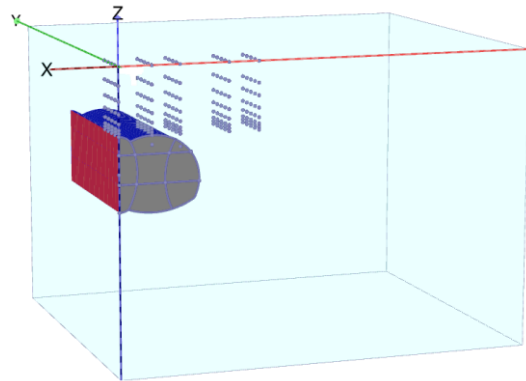
#### ۳-۳- گام‌های حفاری و نصب سیستم نگهداری

تونل در بخش فوقانی گالری مرکزی در ۳۰ مرحله با گام‌های حفاری یک متری آغاز و در بخش میانی و زیرین گالری مرکزی نیز همانند بخش فوقانی در ۳۰ مرحله با گام حفاری یک متری انجام گرفت. در مرحله اول مقدار جابه‌جایی کل بعد از اتمام بخش فوقانی گالری مرکزی، تقریباً  $7/85$  میلی‌متر، جابه‌جایی قائم در راستای سقف  $6/72$  میلی‌متر و آماس کف تونل  $7/8$  میلی‌متر مشاهده شده است. در مرحله دوم با حفاری قسمت میانی گالری مرکزی، میزان جابه‌جایی کل به  $15/01$  میلی‌متر، جابه‌جایی قائم سقف به  $6/84$  میلی‌متر و آماس کف تونل به  $14/85$  میلی‌متر رسیده است. همچنین در مرحله سوم مقدار جابه‌جایی کل بعد از اتمام بخش‌های فوقانی، میانی و زیرین گالری مرکزی، تقریباً  $11/28$  میلی‌متر، جابه‌جایی قائم سقف به  $4/78$  میلی‌متر و آماس کف تونل به  $8/09$  میلی‌متر به دست آمده است. بنابراین حداکثر مقدار جابه‌جایی کل بعد از اتمام حفاری بخش مرکزی تونل (پایان حفاری مرحله سوم) حدود  $15$  میلی‌متر در کف تونل برآورد شده است. همچنین حداکثر مقدار نشست سطح زمین بعد از پایان حفاری گالری مرکزی حدود  $6$  میلی‌متر محاسبه شده است.

پس از اتمام حفاری گالری مرکزی و با توجه به تقارن مدل، ابتدا یک دیواره میانی به ضخامت  $40$  سانتی‌متر نصب شده است و سپس شروع به حفاری قسمت فوقانی، میانی و زیرین گالری جانبی سمت راست تونل می‌شود. به این ترتیب در مرحله چهارم حفاری مقدار جابه‌جایی کل پس از طی  $30$  گام حفاری به  $11/44$  میلی‌متر، جابه‌جایی قائم سقف به  $6/4$  میلی‌متر و آماس کف تونل به  $6/63$  میلی‌متر رسیده است. در مرحله پنجم جابه‌جایی کل حدود  $14/63$  میلی‌متر، جابه‌جایی قائم سقف  $8/96$  میلی‌متر و آماس کف تونل  $14/48$  میلی‌متر محاسبه شده است که بیشترین میزان جابه‌جایی در این مرحله در کف تونل مشاهده شده است. در مرحله ششم (حفاری بخش زیرین گالری جانبی) میزان جابه‌جایی کل  $13/58$  میلی‌متر، جابه‌جایی قائم سقف  $6/59$  میلی‌متر و آماس کف تونل  $12/84$  میلی‌متر به دست آمده است که دلیل آن برداشت بخشی از بالازدگی کف می‌باشد.

بنابراین حداکثر مقدار جابه‌جایی کل بعد از اتمام حفاری گالری جانبی تونل (مرحله ششم) حدود  $15$  میلی‌متر به دست آمده است. همچنین حداکثر مقدار نشست سطح زمین بعد از

مرزی، ابتدا تعداد گام‌های حفاری و مراحل نصب سیستم نگهداری بر اساس شکل ۴ به ترتیب در مدل عددی اعمال شده‌اند. به منظور بررسی میزان جابه‌جایی روباره و نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل، مجموعه‌ای از نقاط نشانه مطابق شکل ۸ با هدف پایش رفتار تونل تعیین شده است.

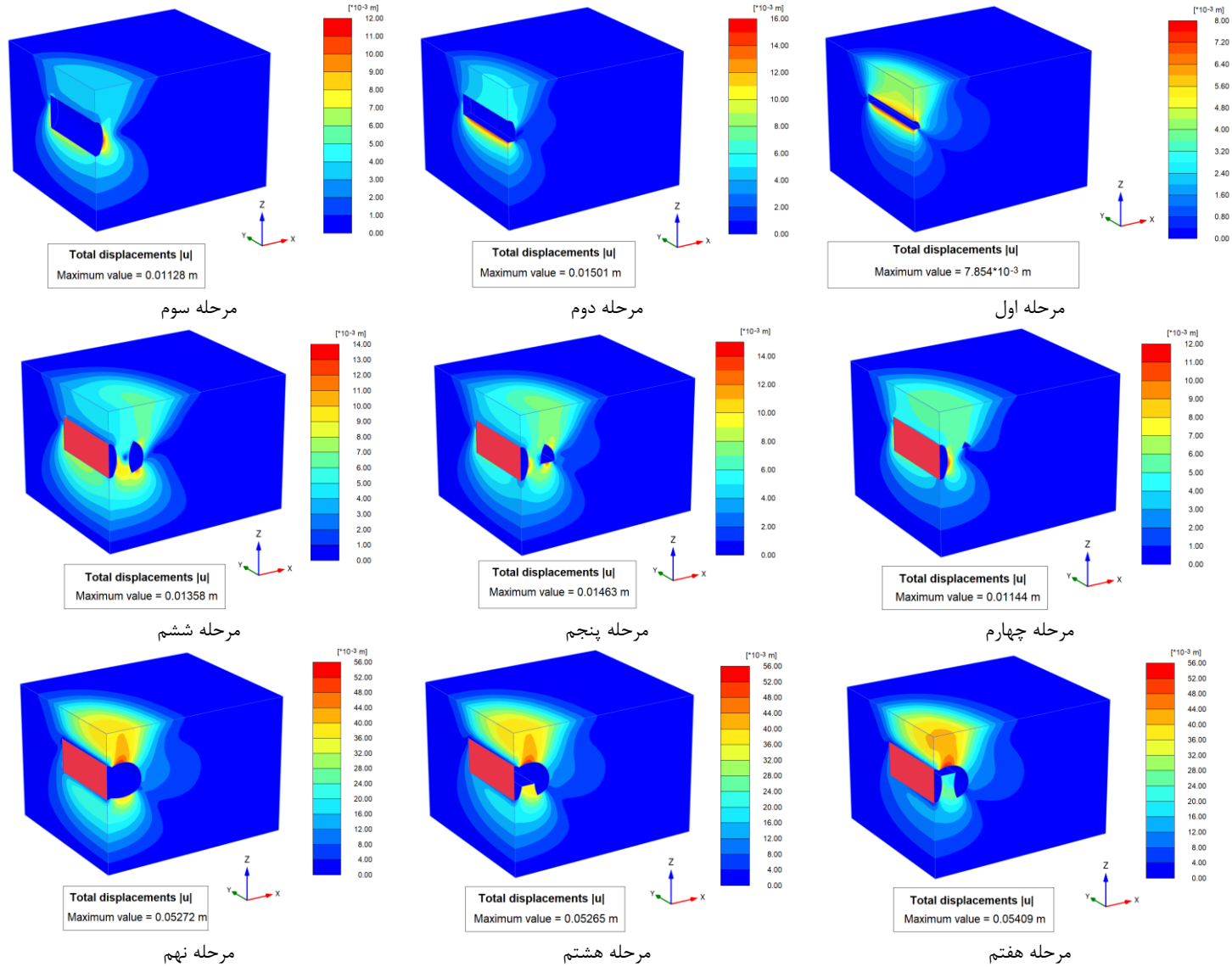


**شکل ۸- موقعیت نقاط نشانه پیرامون تونل در مدل عددی**  
همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، موقعیت نقاط نشانه به این گونه تعیین شده است که در راستای عرض تونل (جهت محور  $x$ ) پنج نقطه نشانه به ترتیب در (۱) سقف مرحله اول حفاری، (۲) سقف مرحله هفتم حفاری، (۳) سقف مرحله چهارم حفاری، (۴) پنج متر دورتر از دیواره تونل و (۵) ده متر دورتر از دیواره تونل مشخص شده است. در راستای طول تونل (جهت محور  $y$ ) نیز پنج نقطه نشانه با فواصل یکسان دو متری معادل پیشروی هر سیکل تعیین شده است. همچنین در راستای عمق تونل (جهت محور  $z$ ) هشت نقطه نشانه به ترتیب با فواصل  $0/5$ ،  $0/5$ ،  $1$ ،  $1/5$ ،  $2$ ،  $2/5$  و  $3$  متری از سقف تونل تا سطح زمین مشخص شده است. به عبارت دیگر محل نقاط نشانه از سقف تونل تا سطح زمین به ترتیب  $0/5$ ،  $1$ ،  $2$ ،  $3/5$ ،  $5/5$ ،  $8$  و  $11$  متر می‌باشد. بنابراین در مجموع جابه‌جایی روباره در  $200$  نقطه نشانه پایش خواهد شد.

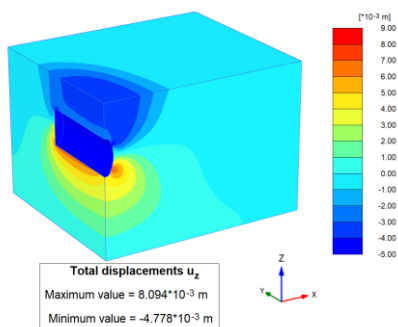
مولفه‌های افقی و قائم جابه‌جایی در حین حفاری هر یک از نُه مرحله احداث تونل در این نقاط نشانه ثبت خواهد شد. برای بررسی تأثیر نشست بر سازه‌های سطحی و همچنین روند توزیع جابه‌جایی‌های پیرامون تونل، کانتورهای جابه‌جایی کل و جابه‌جایی قائم در نُه مرحله حفاری مدل عددی محاسبه و به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر این اساس بعد از اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه، مدل برای رسیدن به تعادل اولیه اجرا شد. پس از تعادل اولیه، حفاری

حفاری این بخش میزان جابه‌جایی کل ۵۴/۰۹ میلی‌متر، جابه‌جایی قائم سقف ۵۳/۱۲ میلی‌متر و آماس کف تونل ۲۷/۵۵ میلی‌متر به دست آمده است و در مرحله هشتم با حفاری قسمت مرکزی گالری میانی، جابه‌جایی کل ۵۲/۶۵ میلی‌متر، جابه‌جایی قائم سقف ۵۱/۵۹ میلی‌متر و آماس کف تونل ۳۹/۵۰ میلی‌متر محاسبه شده است.

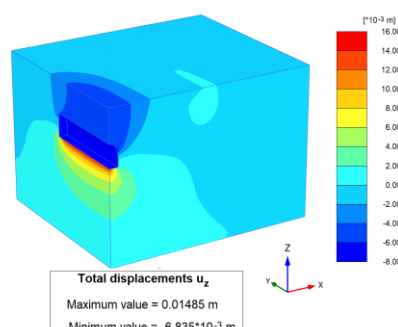
پایان حفاری گالری جانبی حدود ۷ میلی‌متر محاسبه شده است. علت کاهش میزان نشست سطح زمین، نصب دیواره میانی و به تبع آن کاهش اغتشاش تنش ایجادشده در خاک نسبت به مرحله قبل می‌باشد. پس از اتمام حفاری گالری جانبی، در مرحله هفتم شروع به حفاری بخش فوقانی گالری میانی تونل می‌شود که در اثر



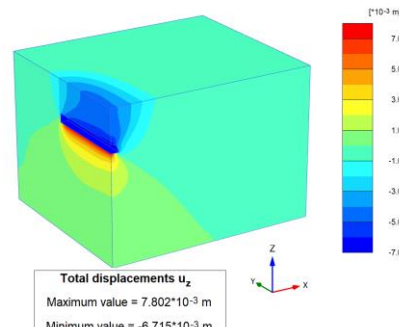
شکل ۹- کانتورها و مقدار بیشینه جابه جایی کل در نه مرحله حفاری



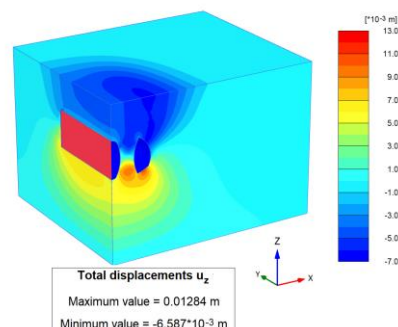
مرحله سوم



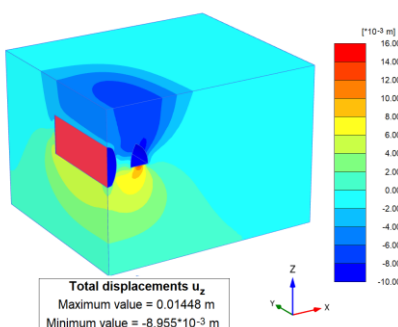
مرحله دوم



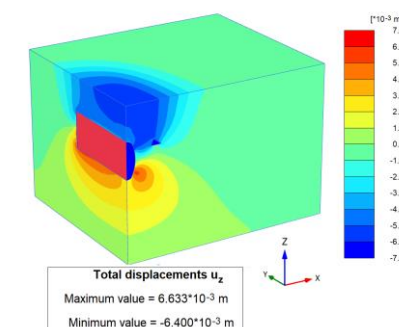
مرحله اول



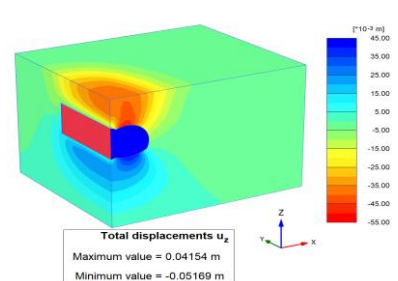
مرحله ششم



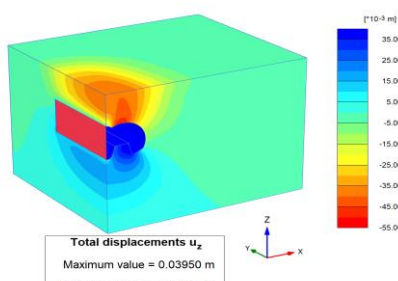
مرحله پنجم



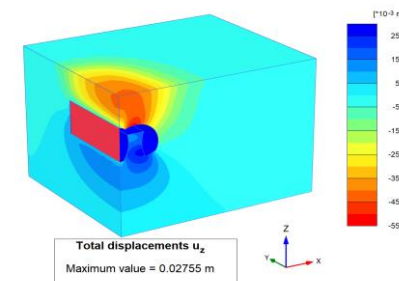
مرحله چهارم



مرحله نهم



مرحله هشتم



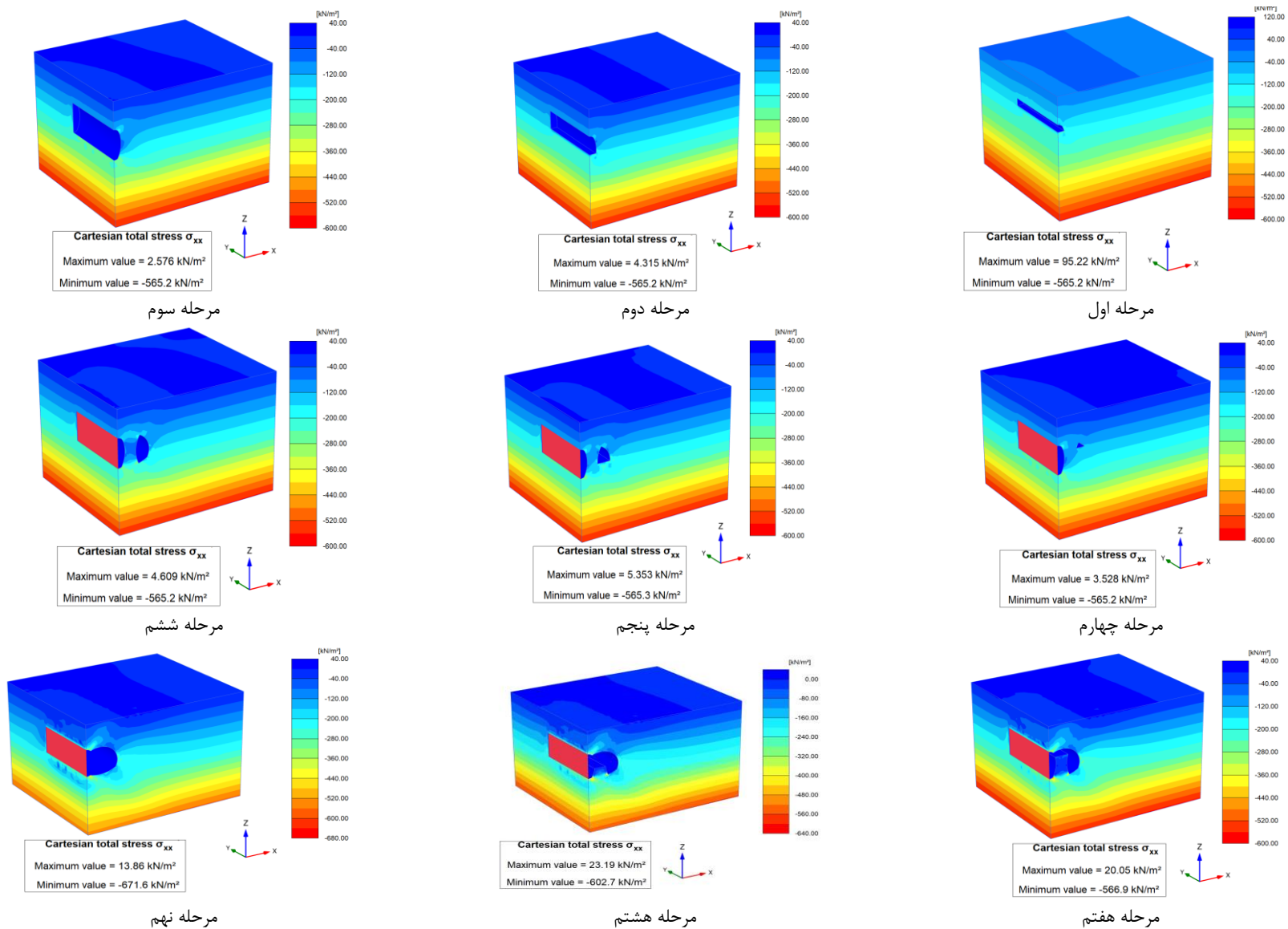
مرحله هفتم

قائم سقف و کف در هر یک از نه مرحله حفاری نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۵ نمودارهای تغییرات منحنی جابه‌جایی کل در هر مرحله حفاری نسبت به حداکثر جابه‌جایی در مرحله قبلی آن ارائه شده است. بر این اساس تا قبل از حفاری گالری میانی تونل (مراحل هفتم، هشتم و نهم حفاری) که خود به‌عنوان یک تکیه‌گاه برای سقف تونل و همچنین به‌عنوان عاملی برای توزیع تنش مؤثر بود، حداکثر جابه‌جایی‌ها کمتر از ۱۵ میلی‌متر به دست آمده است. اما پس از حفاری قسمت فوقانی گالری میانی و تکمیل مقطع حفاری تونل، میزان جابه‌جایی سقف تا ۵۳ میلی‌متر و آماس کف تا ۴۲ میلی‌متر افزایش داشته است. همچنین بر اساس نتایج حاصل، پس از حفاری قسمت زیرین هر کدام از گالری‌ها (مراحل سوم، ششم و نهم حفاری) بیشترین آماس کف رخ داده است.

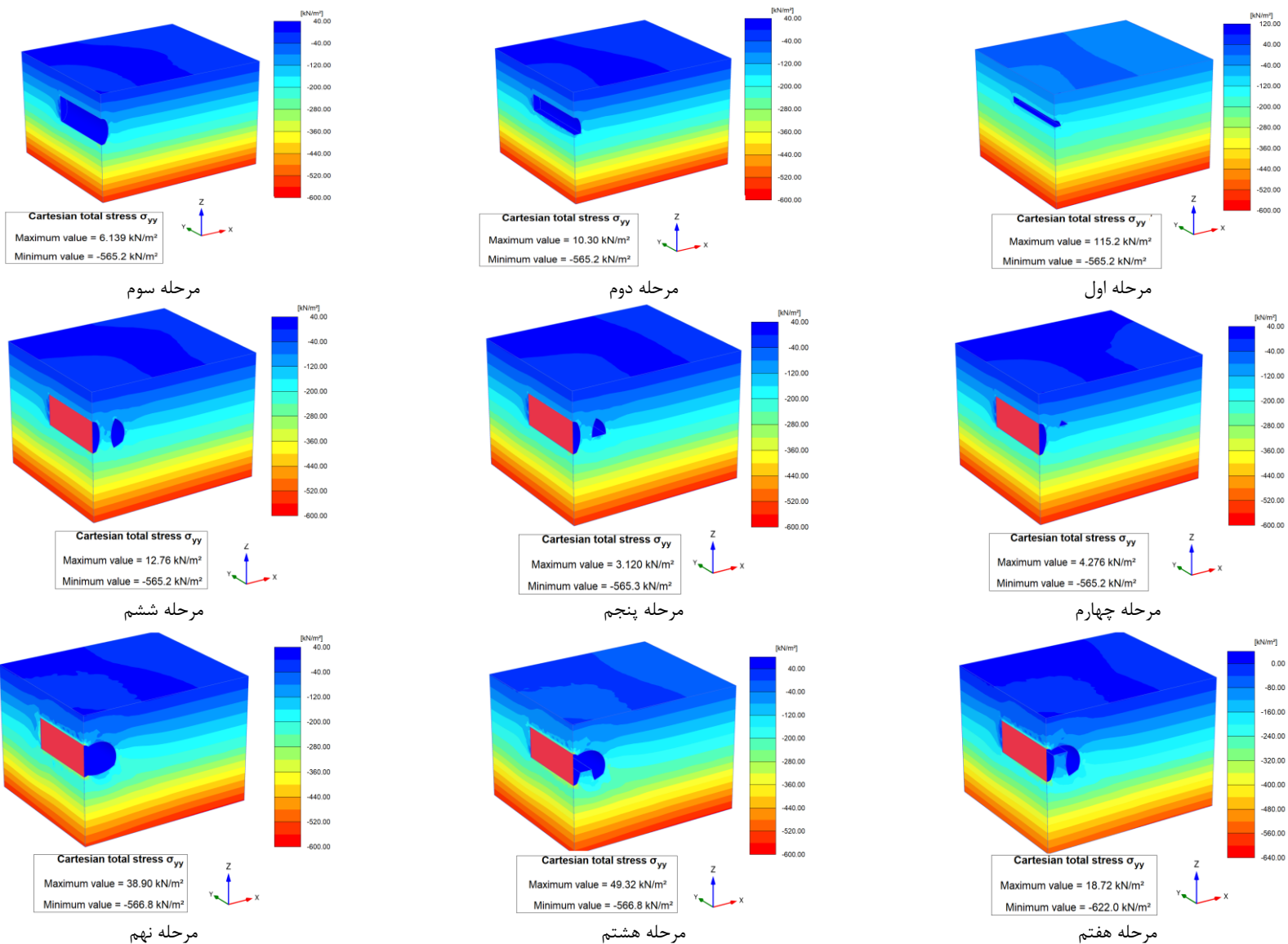
برای بررسی میزان نشست سطح زمین نیز منحنی تغییرات نشست سطح زمین در دو مقطع طولی و عرضی بر اساس نقاط نشانه شکل ۸ در هشت تراز لایه روباره با فواصل مشخص ترسیم شده است. به این ترتیب منحنی‌های نشست طولی در شکل ۱۶ و منحنی‌های نشست عرضی در شکل ۱۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های نشست طولی و عرضی طبق مقاطع معرفی شده در شکل ۸ و برای هشت تراز مشخص در روباره رسم شده‌اند. حداکثر نشست عرضی در فواصل دو متری از سینه‌کار حفاری به ترتیب ۵/۲۳، ۵/۰۶ و ۴/۸۲ و ۴/۶۰ سانتی‌متر به دست آمده است. همچنین حداکثر نشست طولی در روباره بالای مرحله اول حفاری ۳/۹۸ سانتی‌متر، در روباره بالای مرحله هفتم حفاری ۵/۲۵ سانتی‌متر، در روباره بالای مرحله چهارم حفاری ۳/۷۴ سانتی‌متر، در روباره پنج متر دورتر از دیواره تونل ۱/۸ سانتی‌متر و در روباره ده متر دورتر از دیواره تونل ۰/۹۷ سانتی‌متر محاسبه شده است. بر این اساس گودی نشست در محدوده ۲ تا ۵ متری از دیواره میانی تونل در سطح زمین تشکیل خواهد شد و به تدریج با پیشروی سینه‌کار به تعادل خواهد رسید. لذا کنترل جابه‌جایی خاک روباره در سه مرحله پایانی حفاری برای حفاری گالری میانی تونل نقش اصلی را در کنترل نشست سطح زمین خواهد داشت.

در نهایت پس از پایان مرحله نهم حفاری، حداکثر مقدار جابه‌جایی کل ۵۲/۷۲ میلی‌متر، جابه‌جایی قائم سقف ۵۱/۶۹ میلی‌متر و آماس کف تونل ۴۱/۵۴ میلی‌متر به دست آمده است که به علت جابه‌جایی‌های افقی حدود ۳۴ میلی‌متری در دیواره تونل منجر به ایجاد ترک‌هایی در سازه‌های سطحی اطراف خواهد شد. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان جابه‌جایی‌ها مربوط به ناپایداری سقف و بالازدگی‌ها کف تونل ناشی از افزایش تنش‌های افقی در اعماق کم می‌باشد. همچنین بیشترین میزان نشست سطح زمین در پایان نه مرحله حفاری حدود ۵۲ میلی‌متر برآورد شده است. برای بررسی وضعیت تنش‌های القایی ناشی از حفاری مراحل مختلف تونل، کانتورهای مربوط به تغییرات تنش افقی در جهت محور  $x$  در شکل ۱۱، تغییرات تنش افقی در جهت محور  $y$  در شکل ۱۲ و کانتورهای مربوط به تغییرات تنش قائم در شکل ۱۳ برای همه نه مرحله حفاری نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین اغتشاش تنش در مراحل اول، چهارم و هفتم که قسمت فوقانی گالری‌ها حفاری می‌شود، رخ داده است. اغتشاش تنش ایجاد شده پس از نصب سیستم نگهداری و کنترل آماس کف کاهش خواهد یافت. از آنجا که قبل از حفاری گالری جانبی، دیواره میانی به‌عنوان دیوار باربر نصب می‌شود، میزان اغتشاش تنش ایجاد شده در گالری جانبی نیز کاهش خواهد یافت. این دیوار نقش عمده‌ای در توزیع تنش خاک پیرامون گالری میانی ایفا می‌کند. بنابراین با نصب به‌موقع سیستم نگهداری شامل شاتکریت و سیستم نگهداری بتنی در هر گام حفاری و همچنین نصب دیواره میانی تونل پس از حفر گالری مرکزی، می‌توان پایداری این تونل را با ضریب اطمینان مناسب تضمین کرد. همچنین دیواره میانی نقش عمده‌ای در کاهش نشست زمین و تنش در محور تقارن تونل دارد، به‌گونه‌ای که باعث توزیع تنش و تکمیل حلقه تحمل بار می‌شود.

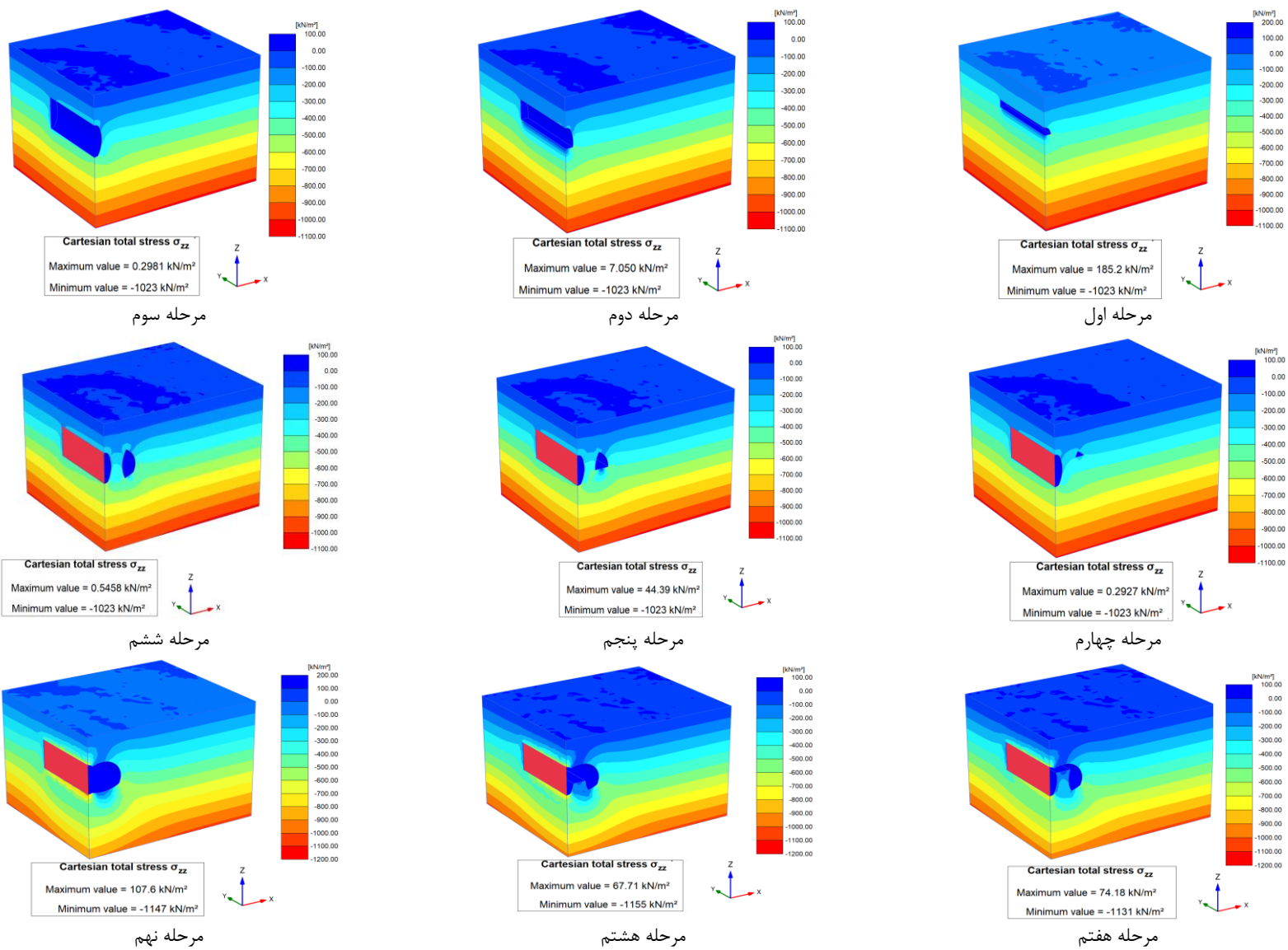
از طرف دیگر بیشترین آماس کف در حین حفاری گالری میانی (مراحل هفتم، هشتم و نهم حفاری) رخ داده است که پس از حفاری گالری میانی و تکمیل مقطع حفاری آماس با نرخ بیشتری افزایش یافته است. این موضوع در شکل ۱۴ به صورت نمودارهای جابه‌جایی



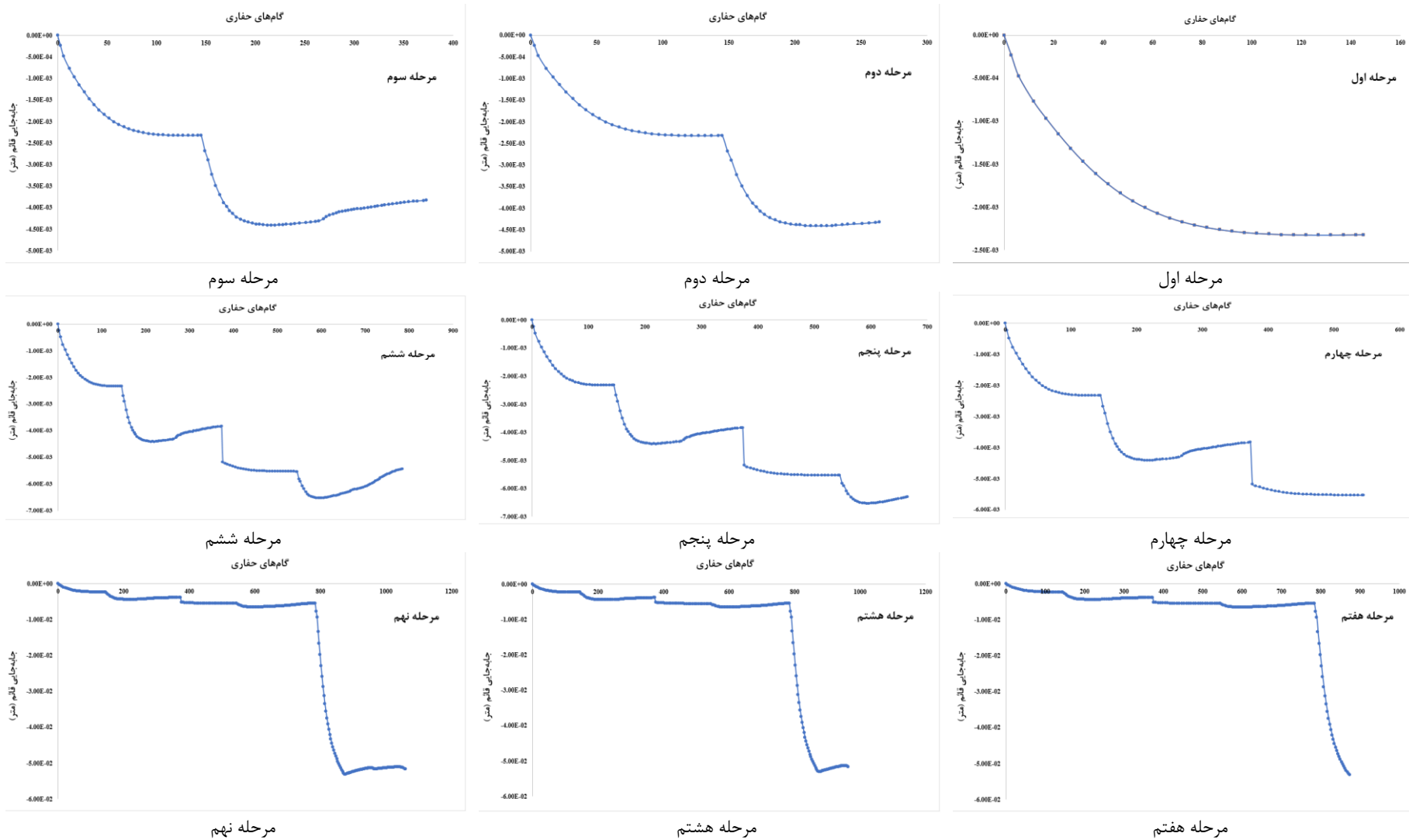
شکل ۱۱- کانتورها و مقدار بیشینه تنش افقی در جهت X در نه مرحله حفاری



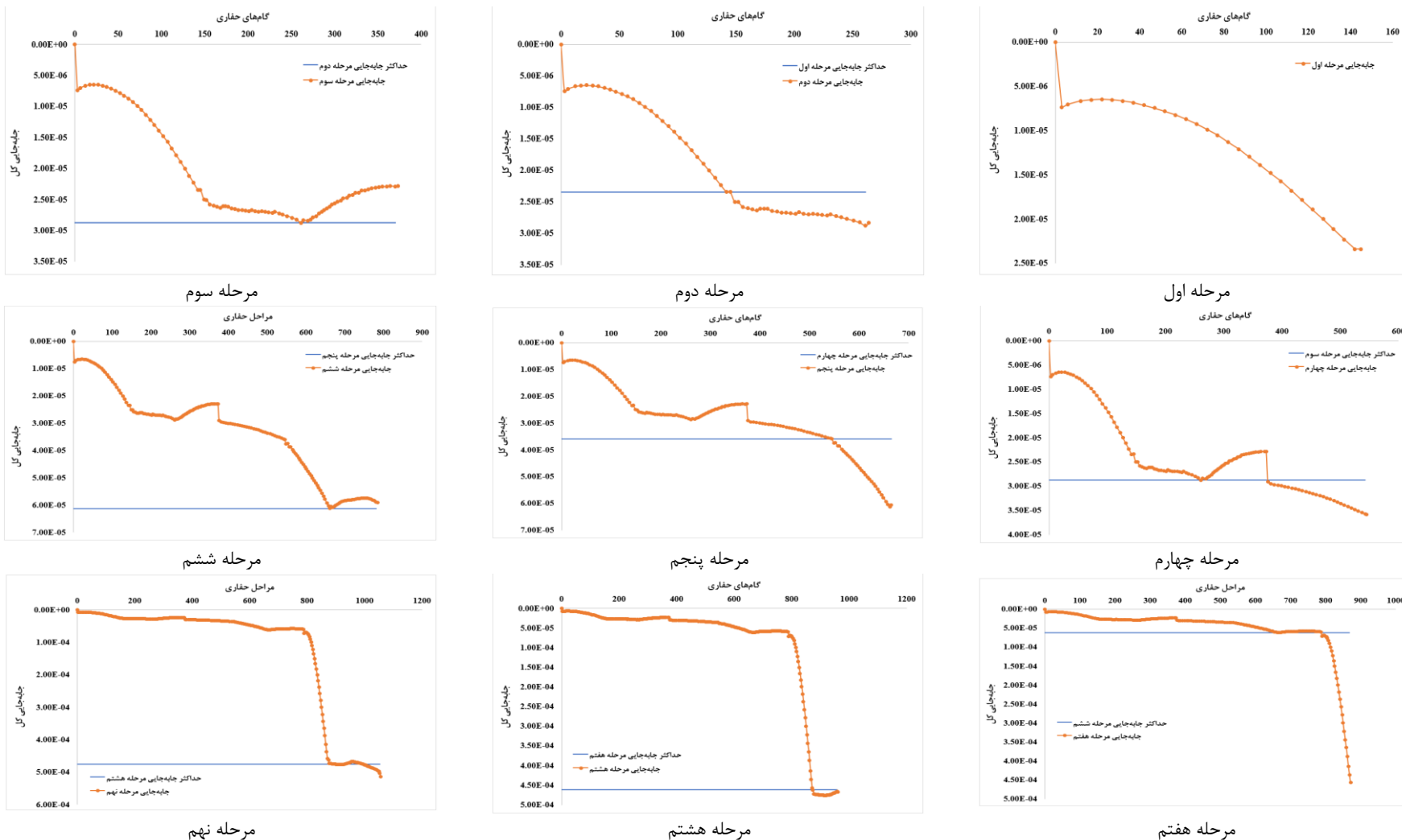
شکل ۱۲- کانتورها و مقدار بیشینه تنش افقی در جهت y در نه مرحله حفاری



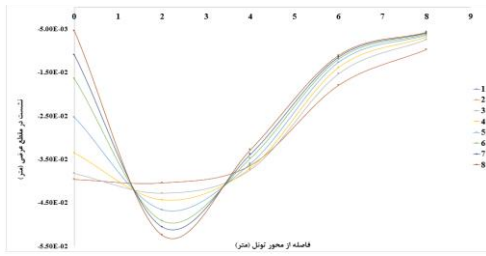
شکل ۱۳- کانتورها و مقدار بیشینه تنش قائم در جهت Z در نه مرحله حفاری



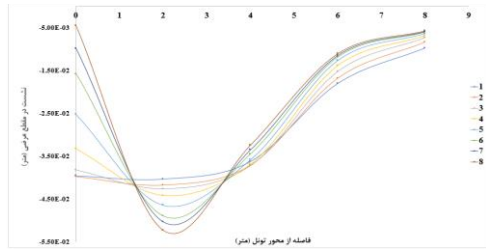
شکل ۱۴- نمودار جابه‌جایی قائم سقف و کف در هر یک از نه مرحله حفاری



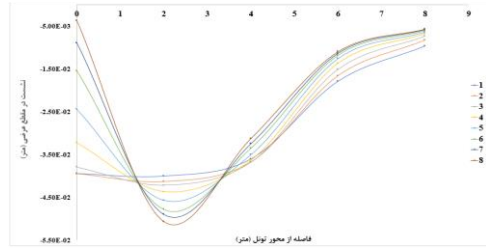
شکل ۱۵- نمودار جابه‌جایی کل در هر مرحله حفاری نسبت به حداکثر جابه‌جایی در مرحله قبل



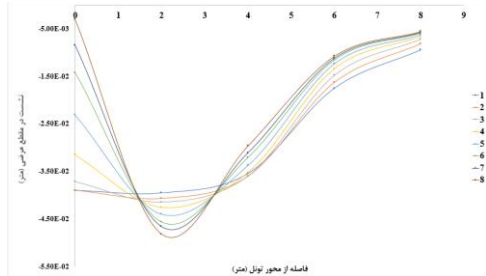
الف) در گام اول حفاری



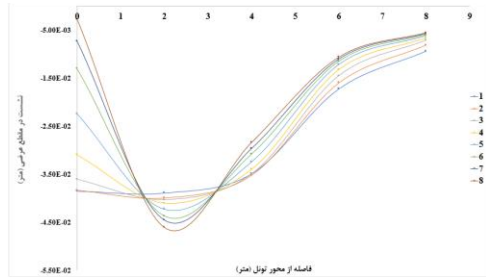
ب) در گام دوم حفاری



ج) در گام سوم حفاری



د) در گام چهارم حفاری

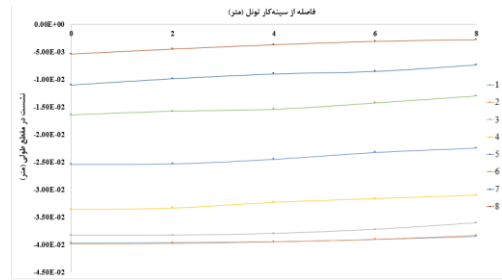


ه) در گام پنجم حفاری

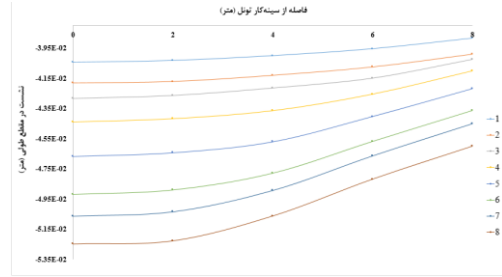
شکل ۱۷- نشست عرضی در سطح زمین و هفت تراز مشخص از روباره (نیمه سمت راست تونل)

۵- نتیجه گیری

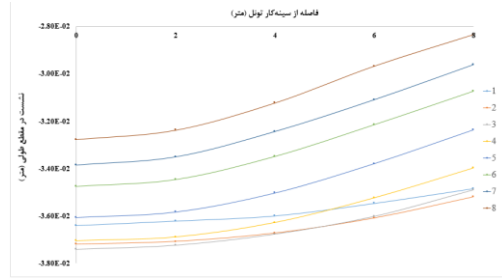
در این تحقیق به منظور بررسی میزان جابه‌جایی‌های سقف و



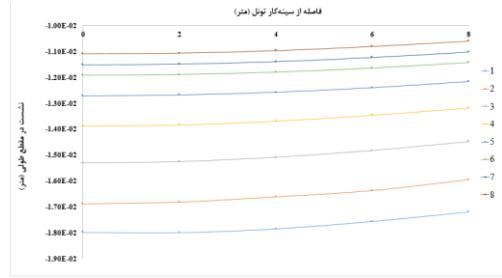
الف) در بالای دیواره میانی تونل



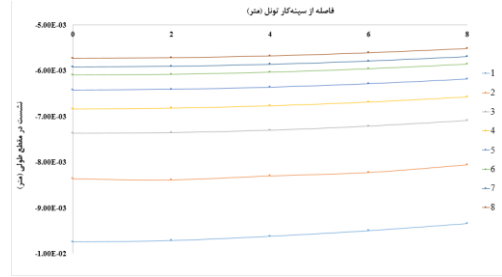
ب) در بالای مرحله هفتم حفاری



ج) در بالای مرحله چهارم حفاری



د) در پنج متر دورتر از دیواره تونل



ه) در ده متر دورتر از دیواره تونل

شکل ۱۶- نشست طولی در سطح زمین و هفت تراز مشخص از روباره

پس از حفاری گالری میانی و تکمیل مقطع حفاری آماس با نرخ بیشتری افزایش یافته است. بر این اساس تا قبل از حفاری گالری میانی تونل (مراحل هفتم، هشتم و نهم حفاری) که خود به‌عنوان یک تکیه‌گاه برای سقف تونل و همچنین به‌عنوان عاملی برای توزیع تنش مؤثر بود، حداکثر جابه‌جایی‌ها کمتر از ۱۵ میلی‌متر به دست آمده است. اما پس از حفاری قسمت فوقانی گالری میانی و تکمیل مقطع حفاری تونل، میزان جابه‌جایی سقف تا ۵۳ میلی‌متر و آماس کف تا ۴۲ میلی‌متر افزایش داشته است. همچنین بر اساس نتایج حاصل، پس از حفاری قسمت زیرین هر کدام از گالری‌ها (مراحل سوم، ششم و نهم حفاری) بیشترین آماس کف رخ داده است. از طرف دیگر حداکثر نشست عرضی در فواصل دو متری از سینه‌کار حفاری به ترتیب ۵/۲۵، ۵/۲۳، ۵/۰۶، ۴/۸۲ و ۴/۶۰ سانتی‌متر به دست آمده است. همچنین حداکثر نشست طولی در روباره بالای مرحله اول حفاری ۳/۹۸ سانتی‌متر، در روباره بالای مرحله هفتم حفاری ۵/۲۵ سانتی‌متر، در روباره بالای مرحله چهارم حفاری ۳/۷۴ سانتی‌متر، در روباره پنج متر دورتر از دیواره تونل ۱/۸ سانتی‌متر و در روباره ده متر دورتر از دیواره تونل ۰/۹۷ سانتی‌متر محاسبه شده است. بر این اساس گودی نشست در محدوده ۲ تا ۵ متری از دیواره میانی تونل در سطح زمین تشکیل خواهد شد و به تدریج با پیشروی سینه‌کار به تعادل خواهد رسید. بنابراین می‌توان با نصب به‌موقع سیستم‌های نگهداری پیشنهاد شده شامل نصب سیستم نگهداری شانکریت پس از هر گام حفاری، نصب دیواره میانی مقطع تونل با ضخامت ۸۰ سانتی‌متر پس از حفر گالری مرکزی تونل و نصب سیستم نگهداری بتنی در پایان عملیات حفاری، پایداری این تونل را با ضریب اطمینان قابل قبول تضمین کرد. البته توجه به نصب به‌موقع سیستم نگهداری در کف تونل بسیار اهمیت دارد تا از گشتاورهای بزرگ خمشی در جهت محور تونل که منجر به ایجاد تمرکز تنش و جابه‌جایی خاک می‌شود، جلوگیری شود.

کف تونل و نیز برآورد نشست سطح زمین در مراحل مختلف حفاری تونل به روش ناتم از مدلسازی عددی المان محدود استفاده شده است. در روش حفاری ناتم حفظ مقاومت اولیه و پایداری زمین به‌عنوان یکی از ارکان این روش تونل‌زنی، منوط به پایش و کنترل تغییرشکل‌ها و جابه‌جایی‌های پیرامون تونل می‌باشد. همچنین با مطالعه رفتار زمین پس از حفاری تونل، کیفیت و زمان نصب سیستم نگهداری اولیه ارزیابی می‌شود. از این رو در این تحقیق جابه‌جایی‌های خاک و تغییرات نمودار نشست سطح زمین در مراحل مختلف حفاری تونل زیرگذر امیرکبیر تهران مورد بررسی قرار گرفته است. حداکثر مقدار جابه‌جایی کل بعد از اتمام حفاری بخش مرکزی تونل (پایان حفاری مرحله سوم) حدود ۱۵ میلی‌متر در کف تونل برآورد شده است. همچنین حداکثر مقدار نشست سطح زمین بعد از پایان حفاری گالری مرکزی حدود ۶ میلی‌متر محاسبه شده است. حداکثر مقدار جابه‌جایی کل بعد از اتمام حفاری گالری جانبی تونل (مرحله ششم) حدود ۱۵ میلی‌متر به دست آمده است. همچنین حداکثر مقدار نشست سطح زمین بعد از پایان حفاری گالری جانبی حدود ۷ میلی‌متر محاسبه شده است. علت تغییر اندک تغییرشکل‌ها و میزان نشست سطح زمین، نصب دیواره میانی و به تبع آن کاهش اغتشاش تنش ایجادشده در خاک نسبت به مرحله قبل می‌باشد. در نهایت پس از پایان مرحله نهم حفاری و تکمیل سطح مقطع تونل، حداکثر مقدار جابه‌جایی کل ۵۲/۷۲ میلی‌متر، جابه‌جایی قائم سقف ۵۱/۶۹ میلی‌متر و آماس کف تونل ۴۱/۵۴ میلی‌متر به دست آمده است که به علت جابه‌جایی‌های افقی حدود ۳۴ میلی‌متری در دیواره تونل منجر به ایجاد ترک‌هایی در سازه‌های سطحی اطراف خواهد شد. بیشترین میزان جابه‌جایی‌ها مربوط به ناپایداری سقف و بالازدگی‌ها کف تونل ناشی از افزایش تنش‌های افقی در اعماق کم می‌باشد. همچنین بیشترین میزان نشست سطح زمین در پایان نهم مرحله حفاری حدود ۵۲ میلی‌متر برآورد شده است. از طرف دیگر بیشترین آماس کف در حین حفاری گالری میانی (مراحل هفتم، هشتم و نهم حفاری) رخ داده است که

## منابع

- [1] H. Chakeri, Y. Ozcelik, and B. Unver, "Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 36, pp. 14–23, 2013.

- [۲] کامکار، فرزاد؛ حسینی، مهدی؛ ۱۳۹۷؛ «بررسی کارایی مدل‌های رفتاری متداول خاک در پیش‌بینی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل در خاک‌های درشت دانه به روش اجزا محدود»، نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره سوم، شماره ۲، ص ۳۵ تا ۵۲.
- [۳] مهدوری، ستار؛ دلفان، سعید؛ ۱۳۹۹؛ «تحلیل پایداری و تخمین نشست سطح زمین در تونل خط دو متروی کرج با استفاده از روش عددی المان محدود»، سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، سازه و زلزله
- [4] P. F. M. Guedes de Melo and C. S. Pereira, "The role of the soil kg value in numerical analysis of shallow tunnels," in *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 2000, pp. 379–384.
- [5] P. A. Vermeer, P. G. Bonnier, and S. C. Möller, "On a smart use of 3D-FEM in tunnelling," in *Numerical Models in Geomechanics - 8th Proceedings of the International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, NUMOG 2002*, 2002, pp. 361–366.
- [6] E. B. Aygar, "Evaluation of new Austrian tunnelling method applied to Bolu tunnel's weak rocks," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 541–556, 2020.
- [7] L. Muller, "Reasons for Unsuccessful Applications of the New Austrian Tunnelling Method.," in *Electric Power Research Institute (Report) EPRI EL*, 1979, pp. 67–72.
- [8] L. Muller, "Removing misconceptions on the New Austrian Tunnelling Method," *Tunnels Tunn. Int.*, no. Spec Is, pp. 15–18, 1990.
- [۹] مهدوری، ستار؛ چهره‌پاک، محمدمهدی؛ ۱۳۹۹؛ «مدل‌سازی عددی و تحلیل پایداری تونل متروی کرج به روش جدید تونل‌سازی اتریشی» سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، سازه و زلزله
- [۱۰] سیدگرمودی، میرمهدی؛ ۱۳۸۲؛ «تعیین نشست خاک در اثر حفاری تونل متروی اصفهان در مقاطع مربوط به خیابان چهارباغ عباسی با توجه به روش حفاری انتخابی و طراحی پوشش تونل» پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [11] L. A. Strokova, "Methods of Estimating Surface Settlement During Driving of Urban Tunnels," *Soil Mech. Found. Eng.*, vol. 47, no. 3, pp. 92–95, 2010.
- [۱۲] یزدپور، مجتبی؛ ۱۳۹۵؛ «مدل‌سازی عددی روش تونل‌سازی NATM مطالعه موردی طراحی تونل‌های بزرگراه حکیم»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [13] J. N. Franzius, "Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence," 2003.
- [14] C. Sagaseta, "Analysis of undrained soil deformation due to ground loss," *Geotechnique*, vol. 37, no. 3, pp. 301–320, 1987.
- [15] A. Verruijt and J. R. Booker, "Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane," *Geotechnique*, vol. 46, no. 4, pp. 753–756, 1996.
- [16] N. Loganathan and H. G. Poulos, "Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 124, no. 9, pp. 846–856, 1998.
- [17] X. Sun *et al.*, "Physical modeling of deformation failure mechanism of surrounding rocks for the deep-buried tunnel in soft rock strata during the excavation," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 74, pp. 247–261, 2018.
- [18] S. Q. Yang *et al.*, "Physical experiment and numerical modelling of tunnel excavation in slanted upper-soft and lower-hard strata," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 82, pp. 248–264, 2018.
- [19] M. R. Moghaddasi and M. Noorian-Bidgoli, "ICA-ANN, ANN and multiple regression models for prediction of surface settlement caused by tunneling," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 79, pp. 197–209, 2018.
- [20] A. Mahmoodzadeh, M. Mohammadi, A. Daraei, H. Farid Hama Ali, N. Kameran Al-Salihi, and R. Mohammed Dler Omer, "Forecasting maximum surface settlement caused by urban tunneling."

- Autom. Constr.*, vol. 120, 2020.
- [21] S. Suwansawat and H. H. Einstein, "Describing Settlement Troughs over Twin Tunnels Using a Superposition Technique," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 133, no. 4, pp. 445–468, 2007.
- [22] W. Li, C. Zhang, W. Zhu, and D. Zhang, "Upper-bound solutions for the face stability of a non-circular NATM tunnel in clays with a linearly increasing undrained shear strength with depth," *Comput. Geotech.*, vol. 114, 2019.
- [23] H. Rehman, A. M. Najji, W. Ali, M. Junaid, R. A. Abdullah, and H. kyu Yoo, "Numerical evaluation of new Austrian tunneling method excavation sequences: A case study," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 3, pp. 381–386, 2020.
- [24] E. Ağbay and T. Topal, "Evaluation of twin tunnel-induced surface ground deformation by empirical and numerical analyses (NATM part of Eurasia tunnel, Turkey)," *Comput. Geotech.*, vol. 119, 2020.
- [۲۵] طهماسبی، محمدعلی؛ شیرین آبادی، رضا؛ رحیمی، اسماعیل؛ موسوی، احسان؛ بانگیان تبریزی، امیرحسین؛ ۱۴۰۰؛ تاثیر سه‌بعدی سیستم پیش‌نگهدارنده تیر پیشرو بر نشست سطح زمین در شرایط تغییرپذیری مکانی مدول یانگ در تونل‌زنی NATM (مطالعه موردی). نشریه علمی پژوهشی مکانیک سنگ، دوره پنجم، شماره چهارم، صفحه ۷۶ تا ۸۸
- [26] M. Neuner, M. Schreter, P. Gamnitzer, and G. Hofstetter, "On discrepancies between time-dependent nonlinear 3D and 2D finite element simulations of deep tunnel advance: A numerical study on the Brenner Base Tunnel," *Comput. Geotech.*, vol. 119, 2020.
- [27] B. Mohammadi-Haji and A. Ardakani, "Performance-based analysis of tunnels under seismic events with nonlinear features of soil mass and lining," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 134, 2020.
- [28] Ö. Satici and T. Topal, "Assessment of damage zone thickness and wall convergence for tunnels excavated in strain-softening rock masses," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 108, 2021.
- [۲۹] آقاجری، میثم؛ دهقان، علی‌نقی؛ لاجوردی، سیدحمید؛ ۱۴۰۱؛ ارزیابی نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی به روش حفاری مرحله‌ای در زمین‌های نرم. نشریه علمی پژوهشی مکانیک سنگ، دوره ششم، شماره دوم، صفحه ۵۲ تا ۶۷
- [۳۰] مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار و D2 – گزارش مطالعات ژئوتکنیک تونل امیرکبیر تهران – شماره مدرک : AMIR-MI04-RET-GE0-002-I00-03d
- [۳۱] مهدوری، ستار؛ مهر ۱۳۹۱؛ «پیش‌بینی همگرایی تونل امیرکبیر با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با روش‌های عددی» چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران؛ دانشگاه تهران.
- [32] S. Mahdevari, H. Shirzad Haghghat, and S. R. Torabi, "A dynamically approach based on SVM algorithm for prediction of tunnel convergence during excavation," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 38, pp. 59–68, 2013.
- [۳۳] بهپور گوهری، م: ۱۳۸۵؛ آموزش جامع Plaxis V8؛ انتشارات فروزش
- [34] R. F. Obrzud, "On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice," in *Numerics in Geotechnics and Structures*, 2010, p. 16.
- [35] by F. Rafea Obrzud Andrzej Truty, "The hardening soil model - a practical guidebook, 1st edition, Zace Services Ltd Software engineering," *Zace Serv. Ltd, Softw. Eng.*, vol. 05, p. 205, 2018.



## Numerical Modeling of Surface Subsidence during Excavation Sequences in the New Austrian Tunneling Method

Satar Mahdevari <sup>1\*</sup>, Mohammad Mehdi Chehrehpak<sup>1</sup>

1. Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 2023. March .02; Accepted: 2023.May.22

(\* corresponding author: satar.mahdevari@aut.ac.ir)

---

### **Keywords**

Surface Subsidence  
Soil Displacement  
Finite Element Numerical Method  
New Austrian Tunneling Method  
Amirkabir Underway Tunnel

---

### **Final English Extended Abstract**

#### **Summary**

Nowadays, with the increase in population and the expansion of metropolitan areas, the volume of intra-city traffic is also increasing. The development of underground communication networks, such as subway and underway, is the most suitable option for solving traffic problems in mega-cities due to the lack of interference with the citizen's traffic.

#### **Introduction**

In this regard, the New Austrian Tunneling Method (NATM) is the best option for tunnel excavation in shallow urban areas and in short distances. For the successful implementation of the NATM excavating method in shallow urban environments, it is very important to estimate and control the soil displacements at the roof, floor, and around the tunnel, and accordingly the surface subsidence at each stage of excavation.

#### **Methodology and Approaches**

In this research, finite element numerical modeling was used in Plaxis 3D software environment to estimate the surface subsidence and the soil displacements of the roof, floor and around the tunnel at each stage of excavation. For this purpose, section T3 of Amirkabir underway tunnel at east of Tehran has been selected as a case study. In the numerical model, the hardening soil behavior model (fully elastoplastic) was selected for the soil mass around the tunnel, and the elastic behavior model was chosen for the shotcrete support system (primary support system) and the middle wall of the tunnel.

#### **Results and Conclusions**

According to the results, after the end of the ninth stage of excavation, the maximum amount of total displacement is 54 mm, the vertical displacement of the roof is 53 mm, and the floor heave is 42 mm. The highest amount of displacements is related to the instability of the tunnel roof and the floor heave due to the increase of horizontal stresses at shallow depths. Also, the maximum surface subsidence at the end of the nine excavation stages is estimated to be about 52 mm, and the subsidence basin will be formed in the range of 2 to 5 meters from the middle wall of the tunnel, and will gradually reach equilibrium with the progress of the tunnel face. Therefore, the control of overburden movement in the final three excavating stages for excavation of the middle gallery of the tunnel will play a major role in controlling the surface subsidence.

---