

## مدلسازی عددی تقاطع غیر هم‌سطح تونل‌های حفاری شده به روش مکانیزه

سید سعید حسینی<sup>۱\*</sup>، سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۲</sup>، میثم جلالی<sup>۳</sup>، عماد خراسانی<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

۴. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

(دریافت: آذر ۱۳۹۵، پذیرش: اسفند ۱۳۹۶)

### چکیده

با افزایش روز افزون سازه‌های زیرزمینی، احداث این سازه‌ها در مجاورت یکدیگر به ویژه ساخت یک تونل جدید در نزدیکی تونل پیشین در محیط‌های شهری امری اجتناب ناپذیر خواهد بود. در بخشی از مسیر احداث قطعه شرقی- غربی تونل خط ۷ متروی تهران، ماشین حفاری مکانیزه با فاصله ۲/۲۵ متر از بالای تونل انتقال پساب ابوذر عبور می‌کند. در مقاله حاضر جهت بررسی اندرکنش بین دو تونل، مدلسازی عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام شده است. به این منظور ابتدا فرایند حفاری مکانیزه تونل ابوذر مدلسازی شده، سپس اثر حفر مرحله‌ای تونل متروی خط ۷ بر سیستم نگهداری تونل ابوذر بررسی شده است. تاریخچه تغییرات نیروهای داخلی، لنگرهای خمشی و تغییر مکان‌های سازه پوشش تونل ابوذر ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است و توصیه‌های مهندسی در تحلیل تونل‌های متقاطع غیر هم‌سطح ارائه شده است. نتایج حاصل از مدلسازی نشان می‌دهد که پس از حفاری تونل مترو، سیستم نگهداری تونل ابوذر به دلیل افزایش ناحیه پلاستیک و آزاد سازی تنش، به سمت بالا جابجا خواهد شد. این جابجایی سبب ایجاد نیروهای داخلی بیش از مقادیر مجاز طراحی شده در لاینینگ تونل ابوذر خواهد شد.

### کلمات کلیدی

تقاطع غیر هم‌سطح تونل‌ها، اندرکنش تونل‌ها، تونل خط ۷ متروی تهران، تونل ابوذر، پایداری سیستم نگهداری

## ۱- مقدمه

به طور کلی حفاری یک تونل در مجاورت تونلی دیگر ممکن است منجر به ایجاد اثرات برهم‌کنشی قابل توجهی شود که عمدتاً وابسته به موقعیت تونل‌ها نسبت به هم (موازی یا متقاطع)، فاصله مابین دو تونل، ابعاد تونل‌ها، صلبیت لاینینگ، وضعیت تنش و محیط حفاری و نیز روش اجرای حفاری تونل است. برهم‌کنش تونل‌های مجاور هم با استفاده از روش‌هایی چون تحلیلی و تجربی، مشاهده میدانی، مدلسازی فیزیکی و مدلسازی عددی توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات انجام گرفته توسط کوپر و همکارانش اشاره کرد که با استفاده از روش مشاهده میدانی، میزان جابجایی تونل‌های دوقلوی واقع در ترمینال مرکزی شهر لندن را طی حفاری سه تونل در زیر آنها را بررسی کردند. آنها در این پروژه به این نتیجه رسیدند که چنانچه فاصله تونل‌های جدید از تونل دوقلوی موجود ۶ تا ۷ برابر قطر تونل‌ها باشد، اندرکنش بین تونل‌ها قابل چشم پوشی است [۱].

لیاوو و همکارانش نیز با استفاده از روش مشاهده میدانی تاثیر حفاری دو تونل با قطر ۶/۲ متر در کنار تونل موجود را بررسی کردند که یکی از تونل‌ها از بالا و دیگری از زیر تونل موجود می‌گذرد. تونل بالایی با فاصله ۱/۴ متری تونل موجود حفاری می‌شود. در هنگام حفاری تونل بالایی سیستم نگهداری تونل موجود به سمت بالا جابجا شد. آنها جابجایی و تغییرات در سیستم نگهداری تونل موجود را به دلیل رهایی تنش و کاهش وزن خاک در بالای تونل می‌دانند [۲].

کیم جهت بررسی اندرکنش احداث تونل‌های متعامد از مدلسازی فیزیکی در خاک رس بهره گرفت. یک تونل با فاصله‌ای برابر با قطر تونل در زیر تونل موجود و تونلی دیگر با فاصله ۰.۴D در بالای تونل موجود حفاری گردیده و تاثیر آن روی تونل موجود با ابزارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در هنگام حفاری تونل بالایی، بیش‌ترین تنش نرمال و بیش‌ترین لنگر خمشی در تاج تونل موجود رخ خواهد و هنگام حفاری تونل پایینی، بیش‌ترین تنش نرمال و بیش‌ترین لنگر خمشی به قسمت کف تونل موجود وارد می‌شود [۳].

لیم نیز جهت بررسی اندرکنش بین تونل‌های متقاطع از مدلسازی فیزیکی استفاده کرد. در این مدل جهت بررسی اندرکنش بین تونل‌ها سه حالت در نظر گرفته شد. در حالت اول تونل جدید زیر تونل موجود و در دو حالت دیگر تونل جدید در بالای تونل موجود با نسبت C/D (C: فاصله تاج تونل جدید تا سطح زمین، D: قطر تونل) متفاوت ساخته شد. نتایج نشان داد که میزان نشست در حالتی که تونل جدید در بالای تونل موجود با نسبت C/D کمتر حفاری شود، نسبت به دو حالت دیگر بیش‌تر است. همچنین بیان شد که میزان تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی در لاینینگ تونل موجود، هنگامی که تونل جدید در زیر تونل موجود حفاری شود بیش‌تر است [۴].

لیو و همکاران، جهت بررسی اندرکنش بین تونل‌های متقاطع غیر هم سطح در منطقه سیدنی از نرم‌افزار ABAQUS استفاده کردند. در منطقه مورد بررسی تنش‌های افقی نسبتاً زیاد است. در بررسی توالی ساخت مشخص شد که در حالتی که تونل عمیق از زیر تونل کم عمق عبور می‌کند، تغییر شکل‌های ایجاد شده در تونل موجود بیش‌تر از حالتی است که تونل کم عمق از روی تونل عمیق عبور می‌کند [۵].

لی و همکاران تاثیر حفاری تونل مترو واقع در شهر شانگهای را بر تونل انتقال رودخانه با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D بررسی کردند. تونل مترو با قطر ۶/۲ متر از بالای تونل انتقال آب که دارای قطری معادل ۱۱/۳۶ متر با فاصله ۵ متر عبور می‌کند. نتایج حاصل از مدلسازی نشان دادند که با حفاری تونل مترو سیستم نگهداری تونل انتقال آب دچار بالازدگی خواهد شد و بیش‌ترین جابجایی دقیقاً در زیر تونل مترو رخ خواهد داد. با توجه به افزایش مداوم نیروی محوری کششی در تاج تونل، پیشنهاد شد که به این ناحیه جهت جلوگیری از ایجاد درزه، بیشتر توجه شود. در نهایت بیان شده است که با فاصله گرفتن ۲D (D قطر تونل انتقال آب) از محل تقاطع در راستای تونل آب می‌توان تاثیر حفاری تونل مترو را نادیده گرفت [۶].

رضی و شهریار با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D اندرکنش بین تونل‌های خط ۶ و ۷ متروی تهران را بررسی کردند. در محل تقاطع دو تونل، تونل خط ۷ از روی تونل خط ۶ عبور خواهد کرد و در فاصله ۳ متری از بالای تونل متروی خط ۷ و به موازات تونل خط ۶ کانال انتقال آب هفده

شهریور وجود دارد. در این پژوهش دو پروسه مختلف بررسی شد. در حالت اول، ابتدا تونل خط ۶ و سپس تونل خط ۷ حفاری شود و در حالت دوم، ابتدا تونل خط ۷ و سپس تونل خط ۶ حفاری شود. نتایج نشان داد که در حالت اول نشست سطح زمین ۳۰ میلی‌متر و در حالت دوم ۱۰ میلی‌متر است. همچنین بیان شد در حالت اول پوشش کانال هفده شهریور با مشکلات ناپایداری مواجه خواهد شد اما در حالت دوم پوشش این تونل پس از عبور تونل‌های خط ۶ و ۷ پایدار خواهد ماند [۷].

معادیکخواه و زارع با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D تاثیر حفاری قطعه شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران بر پایداری تونل فاضلاب شرق تهران را بررسی کردند. تونل مترو با فاصله ۲ متر از زیر تونل فاضلاب عبور می‌کند. نتایج حاصل از مدلسازی نشان داد که با حفاری تونل مترو، تونل فاضلاب دچار نشست خواهد شد و این جابجایی باعث ایجاد نیروهای محوری کششی قابل توجهی در جهت طولی خواهد شد که بیشتر از مقادیر مجاز طراحی شده است [۸].

چاکری و همکاران تغییرات توزیع تنش، جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها و نشست سطحی که ممکن است هنگام عبور تونل دو قلوی توحید از زیر تونل خط ۴ متروی تهران رخ دهد، بررسی کردند. همچنین در این مطالعه تاثیر فاصله بین تونل‌های دوقلو توحید بر اندرکنش تونل‌ها بررسی شد که نتایج نشان داد، با افزایش فاصله بین دو تونل میزان توسعه زون برشی کاهش یافته است [۹].

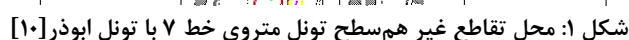
در پروژه حاضر شرایط این گونه است که تونل متروی خط ۷ تهران با فاصله ۲/۲۵ متر از بالای تونل ابودر می‌گذرد. با توجه به فاصله کم این دو تونل انتظار می‌رود ترکیب تنش‌های القایی در منطقه تقاطع دو تونل باعث افزایش جابجایی‌ها و گسترش منطقه پلاستیک در خاک این بخش شود و بر سامانه نگهداری تونل ابودر اثر گذارد. به دلیل ماهیت سه‌بعدی مسأله اندرکنش فضاهای زیرزمینی، مدلسازی عددی به عنوان ابزار مناسبی برای تحلیل این گونه مسائل پیچیده به شمار می‌رود. مزیت این روش دستیابی به دید کلی از نظر وضعیت تنش‌ها و جابجایی در خاک و بررسی پایداری سامانه نگهداری تونل است. از این رو جهت بررسی اندرکنش بین دو تونل از نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده است. هدف از مدلسازی، بررسی تاثیر پایداری سیستم

نگهداری تونل ابودر طی مراحل حفاری تونل مترو خط ۷ تهران است. به این منظور پس از حفاری تونل ابودر و ثبت تاریخچه‌هایی بر سیستم نگهداری این تونل، اقدام به حفاری تونل مترو شده است. تاثیر حفاری تونل مترو بر تونل ابودر به صورت گام به گام برداشت شده و چگونگی جابجایی سیستم نگهداری و تغییرات نیروهای محوری و برشی و همچنین لنگرهای خمشی در راستای عرضی و طولی ارائه شده است. سپس با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی، پایداری سیستم نگهداری تونل ابودر تحلیل و در نهایت راهکارهای پیشنهادی جهت کاهش اندرکنش بین دو تونل بیان شده است. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بسیار محدود بوده و از موردی به مورد دیگر نتایج متفاوتی داشته است. امید است نتایج این پژوهش گام موثری در این زمینه و در راستای نیاز جامعه مهندسی تونل در کشور باشد.

## ۲- معرفی پروژه

قطعه شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران به طول بیش از ۱۲ کیلومتر، از شهرک امیرالمومنین در شرق تهران آغاز شده و تا تقاطع خیابان قزوین و بزرگراه نواب ادامه می‌یابد. عملیات اجرای این قطعه توسط یک دستگاه ماشین EPB انجام خواهد شد. این تونل در قسمتی از مسیرش با فاصله ۲/۲۵ متری از بالای تاج تونل ابودر که جهت جمع‌آوری آب‌های سطحی طراحی شده است، عبور خواهد کرد. در شکل ۱ محل تقاطع غیر هم‌سطح تونل متروی خط ۷ با تونل ابودر نشان داده شده است [۱۰].

قطر تونل خط ۷ متروی تهران ۹/۱۶۵ متر، ضخامت سگمنت‌ها (قطعات پیش ساخته پوشش تونل) ۳۵ سانتی‌متر، طول سپر ماشین حفاری ۱۰ متر و وزن آن ۷۰۰ تن برآورد شده است. گام‌های حفاری در این تونل (عرض سگمنت‌ها) ۱/۵ متر است. همچنین قطر تونل ابودر ۴/۳۵ متر، ضخامت سگمنت ۲۵ سانتی‌متر و طول شیلد ۷/۵ متر و گام‌های حفاری ۱/۲ متر است. فشار سینه‌کار در هر دو تونل طبق مقادیر طراحی شده ۷۰ کیلو پاسکال است. همچنین میزان فشار تزریق ۱۲۰ کیلو پاسکال است. بار زنده ترافیک نیز ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مربع است [۱۰، ۱۱].



### ۳- وضعیت زمین شناسی

The map shows a geological cross-section with several units labeled ET-2, ET-3, and ET-4. A pink line represents Metro Line 7. A vertical line is labeled BH-2-7. A red circle highlights a specific location, and an arrow points to it with the label 'Abouzar'.

شکل ۲: مقطع زمین‌شناسی مهندسی محل تقاطع تونل مترو و تونل ابودر [۱۲]

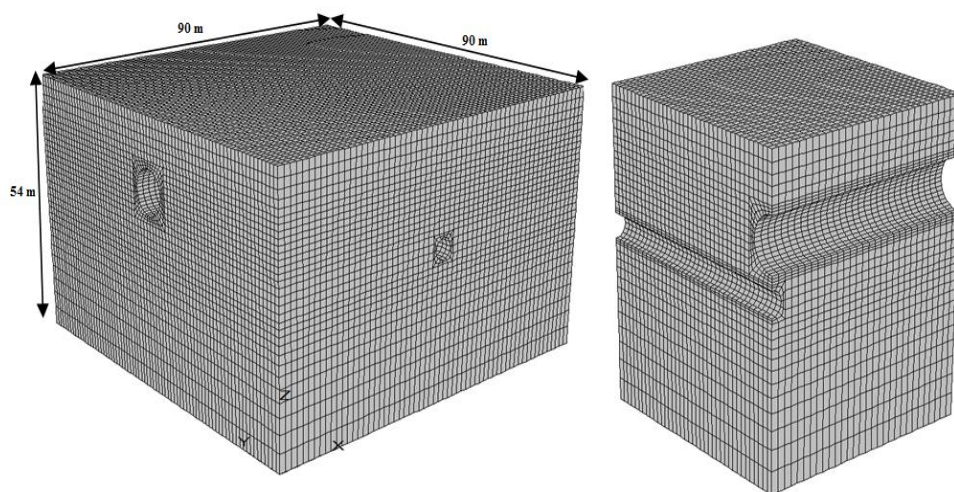
جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل [۱۲]

گونه زمین‌شناسی	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون	وزن مخصوص مرطوب خاک (gr/cm3)
ET-2	۱۵	۳۳	۷۵	۰/۳	۱/۸۴
ET-3	۳۰	۳۳	۵۰	۰/۳۲	۱/۹۰
ET-4	۲۲	۳۲	۵۰	۰/۳	۱/۸۲

## ۴- روش مدلسازی

از آنجا که ماهیت مسئله مورد بررسی سه‌بعدی است و نیز با توجه به پیوسته بودن محیطی که در آن حفاری صورت می‌گیرد، به منظور مدلسازی محل تقاطع دو تونل از نرم‌افزار FLAC3D نسخه 3.00-257 استفاده شده است. این نرم‌افزار بر مبنای روش تفاضل محدود استوار بوده و به منظور شبیه‌سازی رفتار سه‌بعدی سازه‌های خاکی، سنگی و یا سایر موارد، تحت شرایط جریان پلاستیک استفاده می‌شود. در شکل ۳ مدل عددی ساخته شده در نرم‌افزار FLAC3D نشان داده شده است. ابعاد مدل به گونه‌ای در نظر گرفته

شده تا مرزهای مدل بر نتایج به دست آمده، تاثیر گذار نباشد. صفحات کناری و پایینی مدل به ترتیب در راستای افقی و جانبی مقید شده است. بار سطحی ۲۰ کیلوپاسکال به عنوان بار ترافیک به مرز بالایی مدل اعمال شده است. تنش‌های برجای قائم در مدل به صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر با ضریب فشار خاک در حال سکون ( $k=1-\sin(\varphi)$ ) در نظر گرفته شده است. در مدلسازی، لایه‌های خاک با در نظر گرفتن ضخامت لایه‌ها در محل تقاطع به صورت افقی و نامحدود در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری لایه‌های خاکی نیز به صورت الاستیک-کاملاً پلاستیک (با معیار شکست مور-کولمب) انتخاب شده است.



شکل ۳: مدل سه‌بعدی تقاطع تونل مترو و تونل ابودر

از فشار نگهداری جبهه‌کار در نظر گرفته شده است که با توجه به چگالی ۱۳ کیلونیوتن بر مترمکعب دوغاب، به صورت بار گسترده با تغییر خطی در ارتفاع تونل، به طولی معادل با عرض یک رینگ به سطح حفاری اعمال شده است. به منظور مدلسازی فضای خالی مابین سپر و جداره حفاری، این امکان فراهم شده تا نقاط شبکه‌ای واقع بر سطح حفاری بیشینه به میزان اضافه حفاری ایجاد شده توسط کاترهد جابجا شود که این میزان در تونل ابودر ۱/۸ سانتی‌متر و در تونل مترو ۲ سانتی‌متر است [۱۰، ۱۱]. در مدلسازی موجود سعی شده است که گام‌های حفاری تا حد امکان با واقعیت حفاری در تونل هم‌خوانی داشته باشد و در عین حال ساده سازی‌هایی نیز در مدل در نظر گرفته شده است که می‌توان به نحوه ایجاد فشار تزریق در مدل اشاره کرد که این فشار بعد از سپر و بدون قرار دادن سگمنت در آن ناحیه وارد شده است. در نظر گرفتن این نحوه وارد کردن فشار تزریق به این

با توجه به گام‌های حفاری تونل متروی خط ۷ و تونل ابودر، طول المان‌ها در راستای محور تونل خط ۷ که همان راستای X است برابر با ۱/۵ متر و در راستای محور تونل ابودر (راستای Y) برابر با ۱/۲ متر در نظر گرفته شده است. در نتیجه در حفاری تونل‌ها با توجه به طول لاینینگ، گام‌های حفاری تونل ابودر و تونل مترو به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۱/۵ متر انتخاب شده است. قطعات سگمنت تونل‌ها به صورت یکپارچه الاستیک از المان‌های سازه‌ای پوسته (Shell Structural Elements)، مدلسازی شده است. جهت مدلسازی فشار محفظه حفاری، جبهه‌کار حفاری با اعمال بار گسترده نگهداری شده است. فشار نگهداری در تاج هر دو تونل طبق مقادیر طراحی شده ۷۰ کیلوپاسکال و چگالی خاک موجود در محفظه برابر با ۱۵ کیلونیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. همچنین فشار تزریق پشت سگمنت طبق مقادیر اجرایی ۵۰ کیلوپاسکال بیش‌تر

به اینکه تونل مترو از بالای تونل ابودر می‌گذرد، اثر وزن دستگاه حفار بر روی سیستم نگهداری تونل ابودر قابل تأمل است. از این‌رو وزن دستگاه که معادل ۷۰۰ تن است نیز در مدلسازی در نظر گرفته شده است.

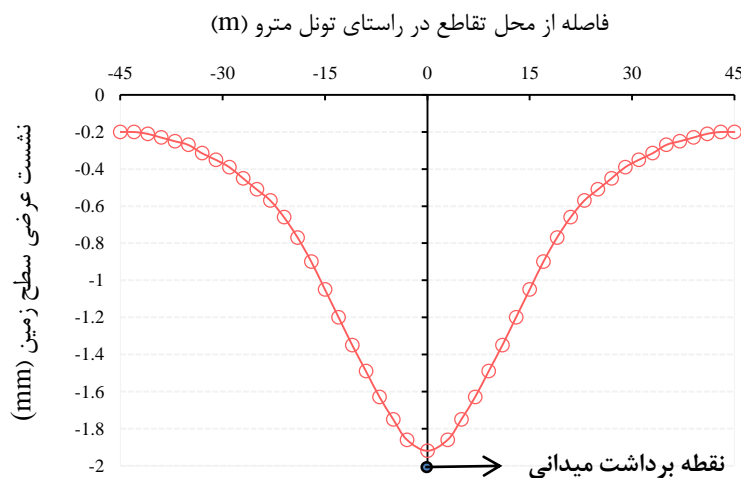
جدول ۲: مشخصات مکانیکی پوشش بتنی تونل‌های مترو خط ۷ تهران و ابودر [۱۱، ۱۰]

سیستم نگهداری تونل	ضخامت (cm)	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت بواسون	دانسیته ( $kg/m^3$ )	تعداد سگمنتهای یک رینگ	مقاومت فشاری سگمنت (MPa)
مترو	۳۵	۲۰	۰/۲	۲۵۰۰	۶+۱	۴۰
ابودر	۲۵	۱۸/۹	۰/۲	۲۵۰۰	۵+۱	۴۰

## ۵- مقایسه نتایج مدلسازی عددی و برداشت‌های میدانی

نشست سطحی بعد از حفاری تونل ابودر محاسبه و در شکل ۴ نشست در مقطع عرضی محل تقاطع و نقطه برداشت میدانی ارائه شده است. همانطور که از نمودار مشخص است میزان بیشینه نشست واقع در محل تقاطع ۱/۹ میلی‌متر است که ۰/۱ میلی‌متر نسبت به نتایج حاصل از ابزاربندی اختلاف دارد.

نتایج ابزاربندی و رفتارنگاری در محل تقاطع نشان داده است که میزان نشست سطحی بعد از حفاری تونل ابودر (قبل از حفاری تونل مترو) ۲ میلی‌متر است. در مدل ایجاد شده



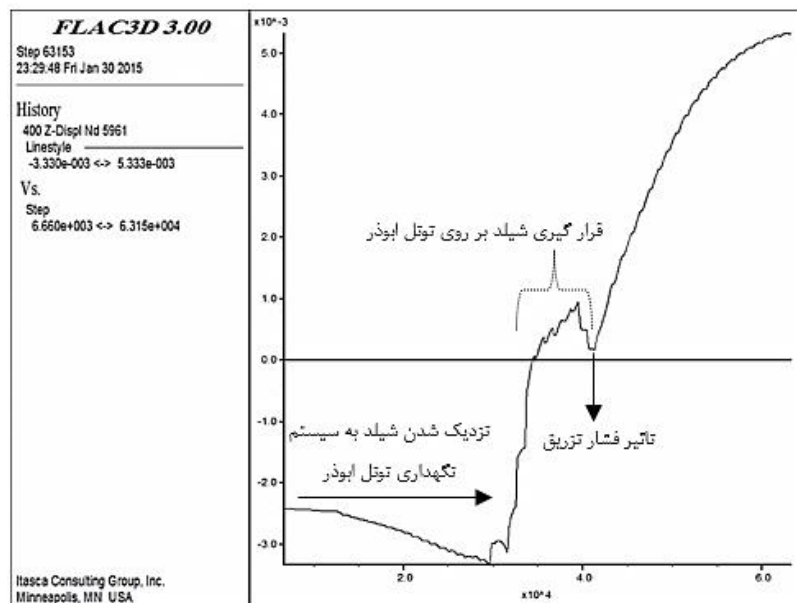
شکل ۴: نشست عرضی سطح زمین در اثر حفاری تونل ابودر در محل تقاطع قبل از حفاری تونل مترو و مقایسه آن با برداشت میدانی این تونل دچار بالازدگی شده است. بیش‌ترین میزان بالازدگی زمانی رخ داده است که دستگاه حفار تونل مترو به صورت کامل از روی تونل ابودر عبور کرده باشد.

در شکل ۵ چگونگی جابجایی سقف تونل ابودر در تمامی مراحل حفاری تونل مترو نشان داده شده است. می‌توان دید که با کاهش فاصله دستگاه حفاری تونل مترو و تونل ابودر به میزان کمتر از ۱۸ متر، به دلیل وجود فشار سینه‌کار، سیستم نگهداری تونل ابودر (در نقطه تاج) به تدریج به سمت پایین جابجا شده است. پس از رسیدن دستگاه حفار به بالای

## ۶- تحلیل نتایج حاصل از مدلسازی

در مدلسازی حفاری تونل مترو، تاثیر گام به گام حفاری این تونل بر روی تونل ابودر بررسی شده است. جهت بررسی تاثیر حفاری تونل مترو بر روی سامانه نگهداری تونل ابودر در محل تقاطع، از نقاطی بر روی لاینینگ در سقف، دیواره‌ها و کف تونل تاریخچه گرفته شده است. پس از عبور دستگاه حفار تونل مترو از روی تونل ابودر به دلیل آزادسازی تنش ناشی از برداشتن خاک بالای تونل ابودر، سیستم نگهداری

دارد. در ادامه حرکت TBM خط ۷ به جلو، به دلیل وجود فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت، سیستم نگهداری تونل ابودر ابتدا کمی به سمت پایین جابجا می‌شود و سپس با پیشروی دستگاه حفار، میزان جابجایی سیستم نگهداری افزایش یافته و در انتها پس از عبور TBM خط ۷ از روی تونل ابودر، زمانی که فاصله دستگاه حفاری تونل مترو از تونل ابودر به ۳۰ متر رسد، جابجایی به یک میزان ثابت خواهد رسید.



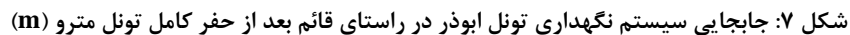
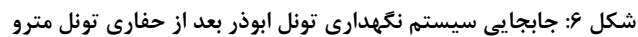
شکل ۵: نحوه جابجایی سقف تونل ابودر در محل تقاطع طی مراحل حفاری تونل مترو، محور افقی: پیشروی سپر خط ۷ (mm)، محور قائم: تغییر مکان تاج تونل ابودر (m) (علامت مثبت و منفی در راستای قائم به ترتیب بیانگر به بالا و پایین حرکت کردن سیستم نگهداری تونل ابودر نسبت به حالت اولیه سیستم نگهداری است)

شکل ۸ میزان نشست عرضی سطح زمین (در عرض تونل ابودر، در امتداد تونل مترو) طی مراحل مختلف حفاری تونل مترو نشان داده شده که بیش‌ترین میزان نشست سطحی ۱۸ میلی‌متر است. قابل ذکر است که نتایج ایزاربنندی نشان می‌دهد بیش‌ترین میزان نشست بعد از حفاری کامل تونل خط ۷ متروی تهران ۱۲ میلی‌متر است که با بیش‌ترین میزان نشست حاصل از مدلسازی اختلاف جزئی دارد. این امر می‌تواند به دلیل عملکرد متفاوت لایه‌های سطحی مانند آسفالت در فرآیند نشست زمین باشد که با توجه به طول نسبتاً کم پین‌های نشست‌سنجی، نتایج حاصل از این ابزار تحت تأثیر قرار می‌گیرد. وجود ابزارهای کشیدگی عمقی که در اعماق بیشتر با خاک درگیر می‌شوند می‌تواند کمک شایانی به ثبت تغییر شکل‌های واقعی زمین نماید. همچنین اختلاف ناشی از نتایج مدلسازی و ایزاربنندی می‌تواند ناشی از

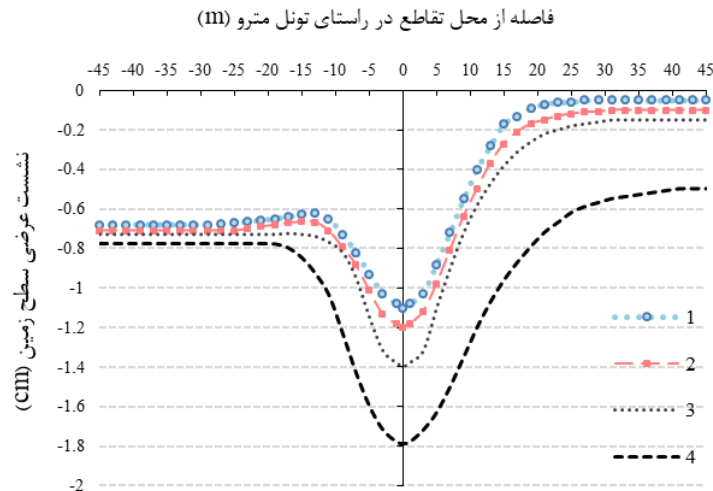
تونل ابودر و برداشتن خاک بالای تونل، تاج تونل ابودر به دلیل آزاد شدن تنش و کاهش وزن بالای تونل و همچنین به دلیل گسترش ناحیه پلاستیک، به سمت بالا جابجا شده است. با وجودی که دستگاه حفار در بالای سیستم نگهداری تونل ابودر قرار دارد، باز هم سیستم نگهداری به سمت بالا حرکت کرده است. یکی از دلایل این جابجایی ناشی از این است که وزن دستگاه ۷۰۰ تن است و خاکی که معادل با حجم دستگاه برداشته شده است به صورت تقریبی ۱۳۰۰ تن وزن

قبل از حفاری تونل مترو، سیستم نگهداری تونل ابودر به دلیل بار ناشی از روباره دچار تغییر شکل شده است، به طور مثال می‌توان به تاج تونل اشاره کرد که به دلیل فشار ناشی از روباره ۲/۴ میلی‌متر به سمت پایین جابجا شده است. با در نظر گرفتن این میزان جابجایی سیستم نگهداری تونل ابودر بعد از حفاری تونل مترو ۷/۷۳ میلی‌متر به سمت بالا حرکت کرده است. در شکل ۶ میزان جابجایی سقف و کف تونل ابودر پس از حفاری کامل تونل مترو ارائه شده است که نشان می‌دهد، طی جابجایی ایجاد شده سقف تونل ابودر ۷/۷۳ و کف ۶/۷۵ میلی‌متر دچار بالازدگی خواهد شد. طبق شکل ۶ می‌توان در فاصله ۳۰ متری از محل تقاطع در راستای محور تونل ابودر، تأثیر حفاری تونل مترو بر سیستم نگهداری تونل ابودر را نادیده گرفت. همچنین در شکل ۷ جابجایی سیستم نگهدار تونل ابودر با بزرگنمایی مشخص شده است. در

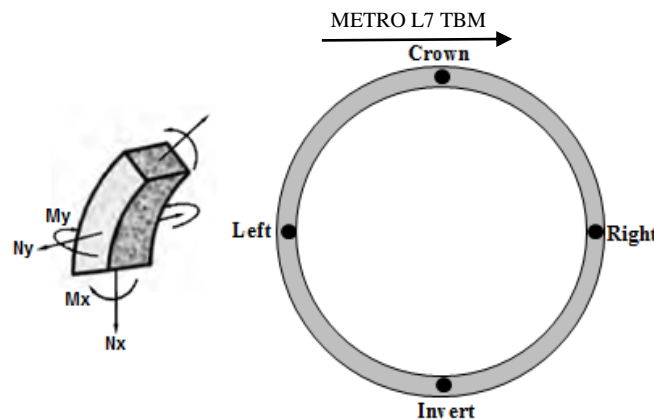
آبرفت تهران در محدوده تقاطع نیز در این اختلاف بی‌تأثیر نیست.



مترو مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۹ سیستم مختصات محلی تعریف شده برای لاینینگ تونل ابوذر و نقاط ثبت تاریخیچه ممان‌های خمشی و نیروهای محوری همراه با جهت آنها در راستای عرضی و طولی تونل ابوذر نشان داده شده است.



شکل ۸: نشست سطح زمین در امتداد تونل مترو طی مراحل مختلف پیشروی تونل خط ۷: ۱) جبهه کار ۱۰/۵ متر قبل از محل تقاطع، ۲) در حین عبور جبهه کار از محل تقاطع، ۳) عبور انتهای سپر از محل تقاطع، ۴) نشست نهایی بعد از حفر کامل تونل مترو



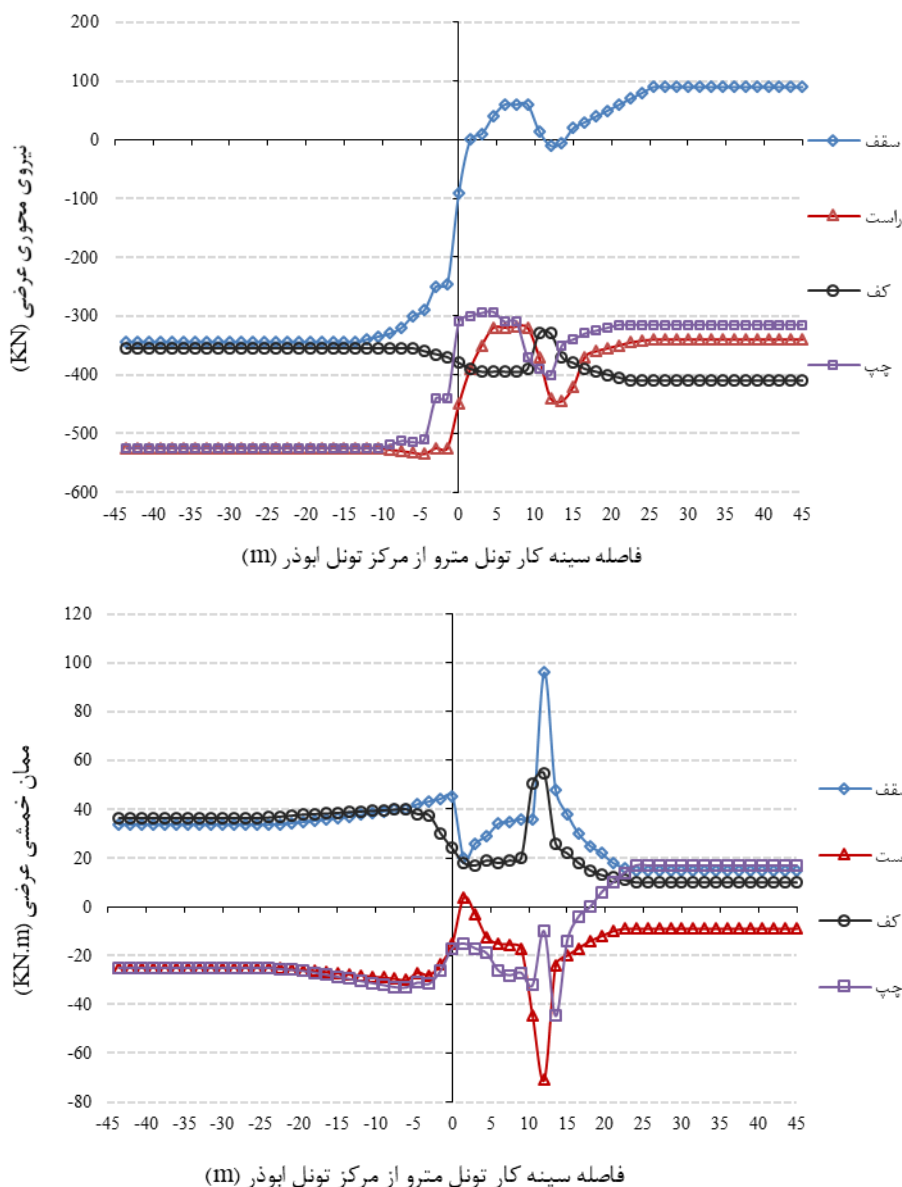
شکل ۹: سیستم مختصات محلی و علائم مورد استفاده در تحلیل سازه تونل ابودر

مترو از مرکز تقاطع ۱۲/۵ متر فاصله گرفته است. این تغییرات به دلیل عبور کامل سپر از بالای تونل ابودر و نصب اولین حلقه پوشش بتنی از تونل مترو در بالای تاج تونل ابودر و اعمال فشار تزریق پشت سگمنت مترو است.

نیروی محوری عرضی و طولی به واسطه اعمال فشار تزریق دچار تغییرات ناگهانی (و البته نه چندان محسوس) شده است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد پس از آن که سینه کار تونل مترو ۲۵ متر از مرکز تونل ابودر فاصله گرفته است تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی عرضی به صفر رسیده و به عبارتی نیروهای عرضی در تونل ابودر به مقادیر ثابتی رسیده‌اند. این مرز برای نیرو و لنگرهای خمشی طولی مطابق شکل ۱۱، ۳۰ متر ثبت شده است. توجه به این نکته لازم است که نسبت قطر تونل ابودر به قطر تونل مترو ۰/۴ است.

شکل ۱۰ و ۱۱، تغییرات ممان خمشی و نیروی محوری عرضی ( $N_x$  و  $M_x$ ) و طولی ( $N_y$  و  $M_y$ ) در نقاط سقف، کف، و دیواره‌های سمت راست و چپ سازه پوشش تونل ابودر را به ازای مقادیر مختلف فاصله جبهه کار دستگاه حفار مترو از محل تقاطع تونل‌ها نشان می‌دهد.

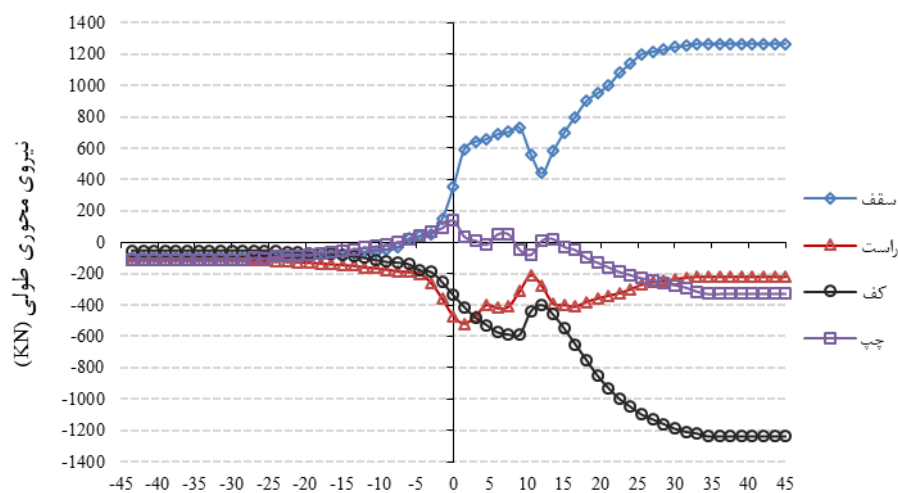
با توجه به نمودارها می‌توان دید که با پیشروی تونل مترو نیروی محوری در سقف تونل از حالت فشاری به کششی تبدیل شده است و نیروی محوری فشاری در کف تونل بیش‌تر شده، که این تغییرات در مقطع طولی نسبت به مقطع عرضی بیش‌تر است. همچنین می‌توان دید که اولین تاثیر حفاری تونل مترو بر روی تونل ابودر در فاصله ۲۴ متری اتفاق می‌افتد. بیش‌ترین تغییرات لنگر خمشی در مقطع‌های عرضی و طولی زمانی رخ خواهد داد که فاصله سینه کار تونل



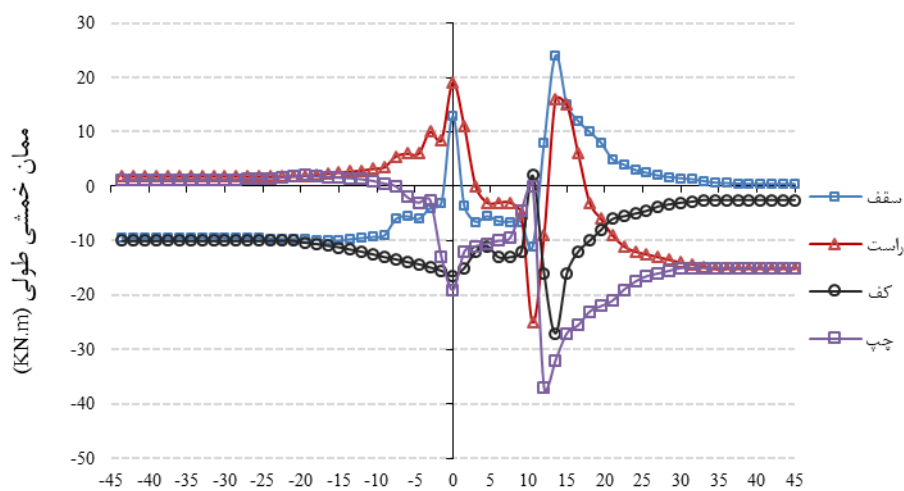
شکل ۱۰: تغییرات ممان خمشی و نیروی محوری عرضی لاینینگ تونل ابودر در محل تقاطع با عبور ماشین حفاری

عرضی سبب ایجاد آسیب‌های سازه‌ای در لاینینگ تونل ابودر نخواهد شد، زیرا نیروهای محوری عرضی در دیواره‌ها بعد از حفاری کامل تونل مترو کاهش یافته است. در کف تونل نیز به میزان اندکی این نیرو افزایش یافته و در تاج تونل نیروی محوری فشاری به کششی تبدیل شده است. نیروی کششی ایجاد شده به میزانی نیست که باعث آسیب سازه‌ای در مقطع عرضی شود. همچنین تغییرات لنگرهای خمشی سیستم نگهداری تونل ابودر در مقطع عرضی در مراحل حفاری تونل مترو به میزانی نیست که باعث ناپایداری سیستم نگهداری شود.

در شکل ۱۲ تغییرات نیروهای برشی سازه پوشش تونل ابودر ارائه شده است. با پیشروی تونل مترو و نزدیک شدن به تقاطع به دلیل فشار سینه کار ناشی از دستگاه حفار تونل مترو، نیروی برشی در سیستم نگهداری تونل ابودر دچار تغییر ناگهانی خواهد شد که این تغییرات در کف تونل نسبت به سایر جهات سیستم نگهداری تونل ابودر کمتر است. ولی همانطور که در شکل می‌توان دید بیش‌ترین تغییرات زمانی ایجاد می‌شود که سپر به طور کامل از محل تقاطع عبور کرده و به مرحله سگمنت‌گذاری در ناحیه تقاطع می‌رسد. نحوه جابجایی سیستم نگهداری تونل ابودر به گونه‌ای است که تغییرات لنگر خمشی و نیروهای محوری القایی در مقطع



فاصله سینه کار تونل مترو از مرکز تونل ابودر (m)



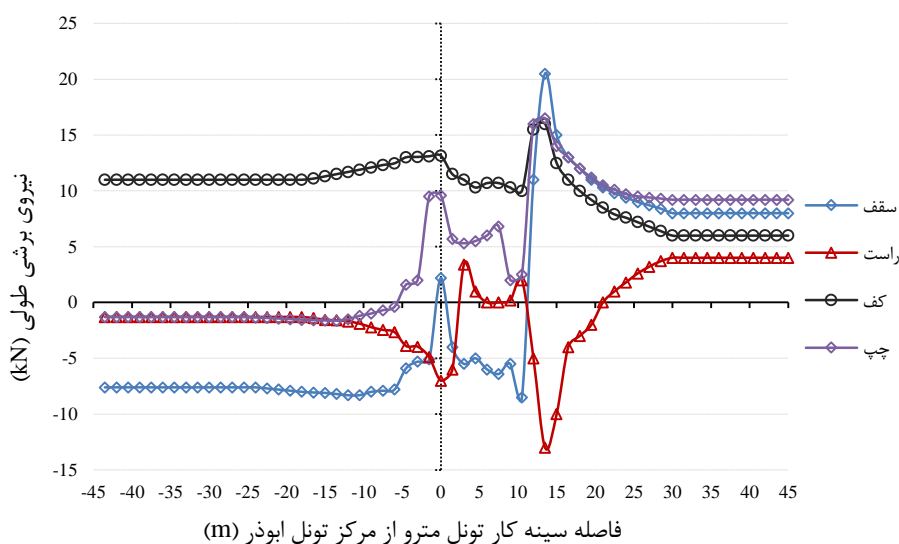
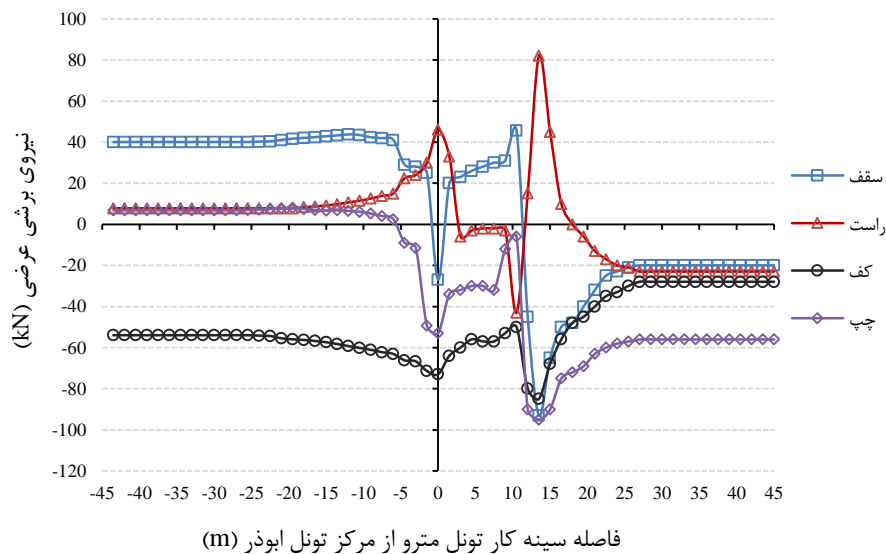
فاصله سینه کار تونل مترو از مرکز تونل ابودر (m)

شکل ۱۱: تغییرات ممان خمشی و نیروی محوری طولی لاینینگ تونل ابودر در محل تقاطع با عبور ماشین حفاری

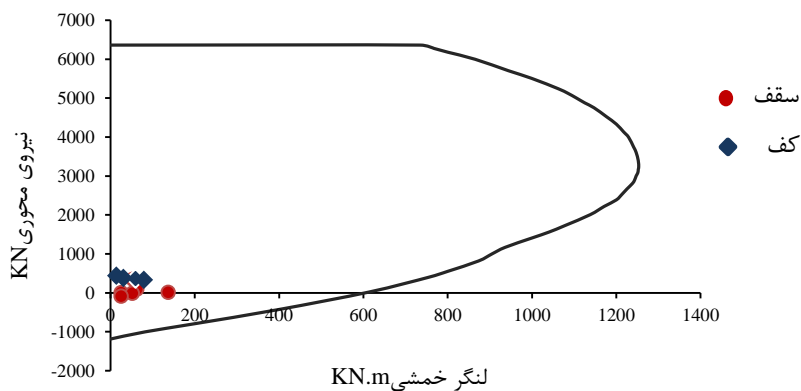
۰/۶ و لنگرهای خمشی سگمنت در ضریب ۱/۴ ضرب شده است.

در شکل ۱۳ می‌توان دید طی اندرکنش ایجاد شده سیستم نگهداری تونل ابودر در راستای عرضی پایدار است. شکل ۱۴ بیانگر این است که طی جابجایی صورت گرفته، زوج نیروی محوری و لنگر خمشی در سقف سیستم نگهداری تونل ابودر در راستای طولی بیش از ظرفیت مجاز طراحی پوشش هستند.

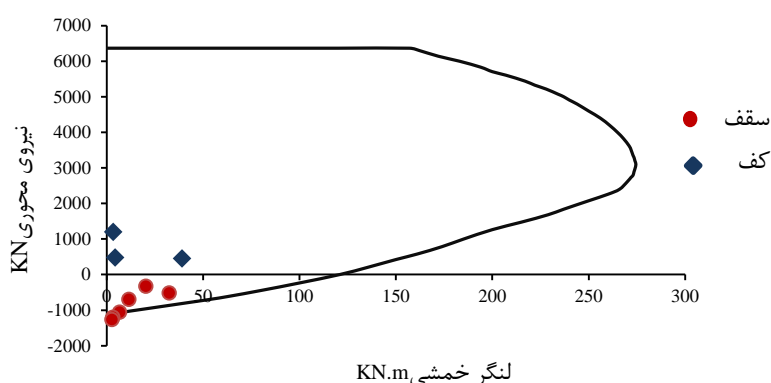
در شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نمودار اندرکنش در راستای عرضی و طولی تونل ابودر به ازای موقعیت‌های مختلف جبهه کار حفاری تونل مترو از محل تقاطع رسم شده است. از آنجایی که طراحی سازه‌ای سگمنت با استفاده از روش ضرایب بار و مقاومت انجام می‌شود [۱۳، ۱۴]. لذا ضریب افزایش بار ۱/۳۵ به مقادیر نیروهای داخلی اعمال شده است. همچنین با توجه به یکپارچه در نظر گرفتن سگمنت در مدلسازی عددی از روش آیین‌نامه ژاپن استفاده شده است [۱۵]. بدین منظور مدول الاستیسته در ضریب کاهش



شکل ۱۲: تغییرات نیروهای برشی عرضی و طولی لاینینگ تونل ابودر در محل تقاطع با عبور ماشین حفاری



شکل ۱۳: مقایسه لنگر خمشی و نیروی محوری عرضی پوشش بتنی تونل ابودر با نمودار اندرکنش



شکل ۱۴: مقایسه لنگر خمشی و نیروی محوری طولی پوشش بتنی تونل ابودر با نمودار اندرکنش

زیر محل تقاطع دو تونل در تاج تونل است. به این ترتیب رینگ‌ها امکان باز شدن داشته و نیروی کششی در آنها ایجاد نخواهد شد. در این روش لازم است تا تغییر مکان‌های تونل با مقادیر مجاز مقایسه شود. همچنین بازشدگی رینگ‌ها از یکدیگر ممکن است آب‌بندی تونل را با مشکل روبرو کند و باید تمهیدات آب‌بندی لازم اندیشیده شود.

از پارامترهای قابل بررسی در تشدید اندرکنش بین دو تونل، بیش‌حفاری (Over-Excavation) است. بنابراین در صورت عدم کنترل حجم مصالح حفاری، احتمال ورود خاک مابین دو تونل به درون محفظه حفاری وجود داشته که با توجه به نزدیکی تراز کف تونل مترو و تاج تونل ابودر، تاثیر بیش‌حفاری بر اندرکنش ممکن است محسوس باشد. همچنین می‌توان با تزریق تحت فشار بنتونیت در فضای خالی بین سپر دستگاه حفاری تونل مترو و خاک، همگرایی خاک بین دو تونل را تا حدی کنترل کرد. از دیگر پارامترهایی که در هنگام عبور تونل مترو از بالای تونل ابودر باید مورد توجه قرار گیرد، فشار سینه‌کار و فشار تزریق پشت سگمنت است که با کنترل این پارامترها می‌توان اندرکنش بین تونل‌ها را به حداقل رساند. همانطور که در شکل ۵ مشخص است فشار سینه‌کار و فشار تزریق پشت سگمنت باعث کاهش جابجایی سیستم نگهداری تونل ابودر خواهد شد. با افزایش این دو پارامتر عملیاتی، علاوه بر این که می‌توان جابجایی سیستم نگهداری تونل ابودر را کاهش داد، نشست سطحی را نیز می‌توان به حداقل ممکن رساند. قابل ذکر است که افزایش این دو پارامتر باید به نحوی باشد که سطح زمین دچار بالازدگی نشود.

به طور کلی از جمله اقدامات پیشگیرانه‌ای که می‌توان پیش از عبور تونل از مجاورت سازه‌های مهم در نظر گرفت،

## ۷- تمهیدات پیشنهادی در محل تقاطع دو تونل

نتایج مدلسازی عددی نشان می‌دهد که حفاری تونل متروی خط ۷ سبب ایجاد نیروهای داخلی بیش از مقادیر مجاز طراحی در لاینینگ تونل ابودر خواهد شد، از این رو اجرای تمهیدات لازم جهت کاهش نیروهای وارد بر تونل ابودر از یک سو و افزایش ظرفیت باربری پوشش تونل ابودر از سوی دیگر الزامی است. سازه تونل ابودر به صورت قطعات بتنی است و زمانی که تحت نیروی کششی قرار می‌گیرد، سگمنت‌ها تمایل به فاصله گرفتن از یکدیگر پیدا می‌کنند. در این مرحله بولت‌ها و ادوات اتصال سگمنت‌ها وارد عمل می‌شوند. بنابراین چنانچه نیروی محوری به صورت کششی باشد لازم است تا علاوه بر کنترل ظرفیت کششی مقطع، بولت‌های اتصال سگمنت‌ها به گونه‌ای طراحی شود که ظرفیت تحمل نیروی کششی وارده را دارا باشند. همچنین لازم است تا تمهیدات لازم برای تحمل این کشش در سگمنت‌ها نیز فراهم شود تا به واسطه ایجاد نیروی کششی در بولت‌ها، بتن سگمنت دچار آسیب و قلوه کن شدگی نشود. این مهم با تعبیه آرماتورگذاری ویژه در اطراف بولت‌ها میسر می‌شود. از آنجایی که ظرفیت کششی مقطع بتن مسلح صرفاً تابع درصد آرماتور آن است [۱۴]، افزایش ظرفیت کششی مقطع در راستای طولی با افزایش درصد آرماتورهای طولی سگمنت محقق می‌شود. با توجه به اینکه حفاری تونل ابودر به اتمام رسیده است و ارائه جزئیات طراحی سازه‌ای هدف مقاله حاضر نیست لذا به این موضوع بیش از این پرداخته نمی‌شود.

یکی از راهکارهای قابل ارائه در مواجهه با نیروی کششی طولی در تاج تونل، باز کردن اتصالات رینگ‌ها به یکدیگر در

شامل تقویت سازه‌ای، تزریق دوغاب جهت تحکیم زمین اطراف تونل و سازه مورد نظر و ایجاد سازه برابر است [۱۶]، [۱۷]. یکی از طرح‌های قابل اجرا، عملیات تزریق از درون تونل ابودر است که با تزریق دوغاب به صورت محیطی در اطراف تونل ابودر می‌توان جابجایی سیستم نگهداری تونل ابودر را کنترل نمود. جهت اجرای این عملیات دو طرح قابل اجراست. در طرح اول تمامی محیط خاک اطراف سیستم نگهداری تونل ابودر حتی کف تونل بهسازی شود و در طرح دوم خاک بالای تونل ابودر و قسمت بالایی دیواره‌ها بهسازی شود و بر خلاف حالت قبل خاک قسمت پایینی دیواره‌ها و کف تونل بهسازی نشود. واضح است که انتخاب اجرای این طرح‌ها، نیاز به بررسی و ارزیابی نیروها و لنگرهای خمشی ایجاد شده در هر دو حالت دارد.

#### ۸- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی تاثیر حفاری تونل مترو بر سیستم نگهداری تونل ابودر با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پرداخته شد. نتایج حاصل از مدلسازی نشان می‌دهد که با حفاری تونل مترو از بالای تونل ابودر سیستم نگهداری تونل ابودر دچار بالادگی خواهد شد. این بالادگی ناشی از آزادسازی تنش و گسترش ناحیه پلاستیک بین دو تونل بعد از حفاری تونل خط ۷ است. از آنجایی که پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بسیار محدود بوده و از موردی به مورد دیگر نتایج متفاوتی گزارش شده است، عمومیت دادن به آنها نیاز به پژوهش‌های وسیع‌تری را طلب می‌کند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اولین تاثیرات حفاری تونل مترو (که به عنوان تونل بالایی نام برده می‌شود) بر سیستم نگهداری تونل ابودر (که به عنوان تونل پایینی نام برده می‌شود) وقتی رخ می‌دهد که سینه‌کار تونل بالایی به ۲۲ متری تقاطع دو تونل (قبل از رسیدن به محل تقاطع) می‌رسد که این مقدار حدود ۵ برابر قطر تونل پایینی و کمی بیش‌تر از ۲ برابر قطر تونل بالایی است. بیش‌ترین تغییرات لنگر خمشی در مقاطع عرضی و طولی زمانی رخ خواهد داد که سینه‌کار تونل بالایی از محل تقاطع ۱۲/۵ متر عبور کرده است (حدود سه برابر قطر تونل پایینی یا ۱/۳۵ برابر تونل بالایی). این تغییرات به دلیل عبور کامل سپر از بالای تونل ابودر و نصب اولین حلقه پوشش بتنی از تونل بالایی در بالای تاج تونل ابودر و اعمال فشار تزریق پشت سگمنت بالایی

است. پس از آن که سینه‌کار تونل بالایی ۲۵ متر از مرکز تونل ابودر فاصله گرفت تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی عرضی به صفر می‌رسد و به عبارتی نیروهای عرضی در تونل ابودر مقادیر ثابتی را اختیار می‌کنند. این مرز برای نیروها و لنگرهای خمشی طولی ۳۰ متر ثبت شده است. به این ترتیب زمانی که فاصله سینه‌کار تونل بالایی از مرکز تونل پایینی حدود ۷ برابر قطر تونل پایینی یا حدود ۳ برابر قطر تونل بالایی است، حفاری تونل بالایی دیگر تاثیری بر نیروهای تونل پایینی ندارد. در تحلیل پایداری سیستم نگهداری تونل ابودر مشخص شد که در مقطع عرضی دچار آسیب‌های سازه‌ای نخواهد شد. ولی در مقطع طولی، نیروهای کششی ایجاد شده در تاج تونل بیش‌تر از مقادیر طراحی شده است، از این رو اجرای تمهیدات لازم جهت کاهش نیروهای وارد بر تونل پایینی الزامی بوده که به طور خلاصه شامل یک یا چند مورد از روش‌های تقویت سازه‌ای پوشش تونل، افزایش مقاومت ادوات اتصال و تمهیدات جانبی آن، تزریق محیط پیرامونی در محل تقاطع، باز کردن ادوات اتصال یا به عبارتی کاهش مقاومت سازه‌ای برای نیروی محوری طولی است.

نیروی محوری عرضی در تاج تونل پایینی با کاهش شدید روبرو شده به گونه‌ای که به صورت کششی ظاهر شده است (تفاضل نیروی کششی و فشاری در تاج تونل پایینی به ۶۰۰ کیلو نیوتن می‌رسد). ممان خمشی عرضی به صورت موضعی به بیش از دو برابر افزایش یافته است اما در نهایت کاهش لنگرهای خمشی در حد ۵۰ درصد ثبت شده است. نیروی محوری طولی در حالت عادی (بدون حضور تونل متقاطع) حدود صفر است که به واسطه حفاری تونل بالایی و وقوع بالادگی تونل پایینی، در تاج و کف تونل پایینی به ترتیب نیروهای قابل ملاحظه کششی و فشاری ایجاد می‌شود.

#### مراجع

- [1] Cooper, M. L., Chapman, D. N., Rogers, C. D. F. & Chan, A. H. C. (2002). Movements in the Piccadilly Line tunnels due to the Heathrow Express construction. *Geotechnique* 52, No. 4, 243-257.
- [2] Liao, S. M., Liu, J. H., Wang, R. L. & Li, Z. M. (2009). Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24, pp.454-465.
- [3] Kim, S.H. (1996). Model testing and analysis of interactions between tunnels in clay. PhD

- [17] O.Y. Ezzeldine, A.A. Darrag. (2006). Instrumentation at the CWO Crossing – El Azhar Road Tunnels and its use in the Design of Future Projects. Utilitization of underground space in urban areas International Symposium, Egept.
- thesis, Department of Engineering Science, University of Oxford.
- [4] Lim, S. (2012). Three dimensional centrifuge and numerical modeling on effects of construction sequences on perpendicularly crossing tunnels. Phd thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology.
- [5] Liu, H. Y., Small, J. C., Carter, J. P. & Williams, D. J. (2009). Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels. *Computers and Geotechnics* 36, No. 5, pp. 880-894.
- [6] Li, P., Du, S. (2012). Responses of Cross-River Tunnel due to Overlying Shield Tunnel Construction ( I ): Influence of Construction Procedure. *ICPTT 2012*: pp. 1585- 1594.
- [7] Razi, A.M. and Shahriar, K. (2014). Numerical modeling of two tunnels cross-cut using FLAC3D software, Case Study: line 6 and 7 of Tehran Metro. 10th national conference tunnel. Tehran, Iran. (in Persian)
- [8] Maadikhah, A. and Zare, Sh. (2012). The investigation into the effect of tunnel excavation of Tehran metro line 7 on East sewage tunnel. 9th national conference tunnel, Tehran, Iran.
- [9] Chakeri, H., Hasanpour, R., Mehmet, A. H., Bahtiyar, U. (2011). Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling. *Bull Eng Geol Environ*, page 439–448. (in Persian)
- [10] Sahel Consultant Engineers. (2009). The report of geometric design of the east-west lot of Tehran metro line 7. Tehran. (in Persian)
- [11] Khakrizab Engineering Co. (2009). The report of implementation method-engineering services of auxiliary tunnel of Abuzar channel. Tehran. (in Persian)
- [12] Sahel Consultant Engineers. (2010). The report of Geological Engineering and Geotechnics of the east-west lot of Tehran metro line 7. Tehran. (in Persian)
- [13] Federal Highway Administration. (2009). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels. FHWA-NHI-09-01. U.S.
- [14] American Concrete Institute (ACI). (1999). *Manual of Concrete Practice (MCP)*.
- [15] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). (2006). *Standard specifications for tunneling*.
- [16] V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mahtab and S. Xu. (2007). *Mechanized Tunnelling in Urban Area*, published by Taylor and Francis Group.