

(پژوهشی)

## بررسی عددی اندرکنش تونل‌های مجاور - تأثیر توالی حفاری (مطالعه موردی: تونل‌های دسترسی شرقی مجموعه ایران مال)

فرشید پیرنیا<sup>۱</sup>، میررئوف هادئی<sup>۲\*</sup>، علیرضا رشیددل<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن، گرایش مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن، گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی، دانشکده مهندسی، دانشگاه ارومیه

(دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۹، پذیرش: آبان ۱۳۹۹)

### چکیده

امروزه با توجه به توسعه شهرها و کمبود فضای سطحی و همچنین افزایش معضل ترافیک نیاز به ساخت فضاهای زیرزمینی به منظور توسعه سیستم‌های حمل‌ونقل شهری افزایش پیدا کرده است. در این تحقیق به بررسی تأثیر توالی حفر تونل‌های مجاور هم‌پرداخته شده است. مورد مطالعاتی استفاده شده در این پژوهش تونل‌های دسترسی مجموعه پروژه ایران مال با مسیر انحنائی می‌باشد. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود Midas GTS به صورت ۳ بعدی استفاده شده و تأثیر توالی حفر تونل‌ها بر میزان نشست سطحی، نیروهای داخلی سازه‌ای وارد بر نگهداری موقت این تونل‌ها بررسی شده است. نتایج نشان داد که حفر متوالی یا با فاصله تونل‌های مجاور، نسبت به حفر همزمان تونل‌ها، مقادیر نشست سطحی کمتری را نشان می‌دهد و در مقادیر نیروها و لنگرهای خمشی وارد بر پوشش موقت تونل‌ها تأثیر بسزایی دارد. در نهایت جهت اعتبارسنجی نتایج نشست سطحی مدل عددی، از داده‌های مانیتورینگ نشست سطحی پروژه ایران مال استفاده شد و مشخص شد که نتایج عددی به نتایج برجا نزدیک می‌باشد.

### کلمات کلیدی

اندرکنش تونل‌های مجاور، مدل‌سازی عددی، روش المان محدود، توالی حفاری، نرم افزار Midas GTS

\* عهده‌دار مکاتبات: [hadei@eng.ikiu.ac.ir](mailto:hadei@eng.ikiu.ac.ir)

## ۱ - مقدمه

روش ساخت تونل‌ها بر میزان نشست سطح زمین و نیروها و ممان خمشی وارد بر پوشش تونل‌ها تأثیر می‌گذارد [۵].

چاکری و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش تفاضل محدود، تأثیر متقابل حفاری تونل‌های دوقلوی توحید را که از زیر تونل خط ۴ مترو تهران عبور می‌کردند، مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که افزایش فاصله افقی بین تونل‌های مجاور باعث کاهش نشست قسمت مرکزی تونل‌های مجاور می‌گردد. با حفر تونل‌های توحید، پوشش شاتکریتی قسمتی از تونل خط ۴ مترو به سمت محل حفاری حرکت می‌کند [۶]. مهدی و شریعتمداری در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روش تفاضل محدود، تأثیر متقابل بین سه تونل مجاور کم عمق در مترو تهران را از لحاظ روش ساخت و طول گام‌های حفاری مورد بررسی قرار دادند و تأثیر این عوامل را بر میزان نشست سطح زمین و تنش‌های وارد بر سیستم نگهداری تونل ارزیابی کردند [۷].

## ۲ - روش عددی المان محدود

یکی از روش‌های شبیه‌سازی و تحلیل تونل‌ها روش عددی المان محدود می‌باشد. نرم‌افزار MIDAS GTS یک نرم‌افزار عددی المان محدود ژئوتکنیکی می‌باشد که توانایی مدل‌سازی و تحلیل سه‌بعدی تونل‌ها را در محیط‌های خاکی و سنگی دارد. این مجموعه نرم‌افزاری دارای یک محیط مدل‌سازی کاملاً ساده بوده و در عین حال محاسبات را با دقت و سرعت بالا انجام می‌دهد. در روش المان محدود، مدل به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود و در صورت لزوم ناپیوستگی‌ها به صورت مجزا و به تعداد محدود با المان‌های خاص به نام المان فصل مشترک، شبیه‌سازی می‌شوند. محدوده مدل، یعنی زمین در برگیرنده، به تعداد محدودی المان تقسیم می‌شود که از طریق نقاط گرهی در گوشه‌های المان‌ها به هم متصل هستند. روش المان محدود دارای مزایای زیر است:

- قابلیت شبیه‌سازی شرایط پیچیده هندسی و رفتاری در سازه‌های سطحی و زیرزمینی
- قابلیت شبیه‌سازی مدل‌های رفتاری پیشرفته و تابع زمان در اجرای پروژه‌های معدنی و عمرانی

## ۳ - مطالعه موردی

مطابق شکل ۱، مورد مطالعاتی در این تحقیق، تونل‌های دسترسی مجموعه ایران مال می‌باشد. تونل‌های مورد نظر در

ارزیابی برهم کنش فضاهای زیرزمینی با یکدیگر و همچنین بین این فضاها با سازه‌های موجود و ارائه راهکارهای مناسب یکی از مهمترین موضوعات تونل‌سازی در محیط‌های شهری است که توجه به آن از اهمیت خاصی برخوردار است. در برخی از موارد ضروری است تا تونل‌ها در مجاورت یکدیگر حفاری شوند که این امر منجر به ایجاد تأثیرات اندرکنشی مهمی می‌شود. این اندرکنش‌ها به فاصله بین تونل‌ها، اندازه‌ی مقطع تونل‌ها، سختی سیستم نگهداری و روش استفاده شده برای حفاری تونل‌ها بستگی دارد [۳-۱].

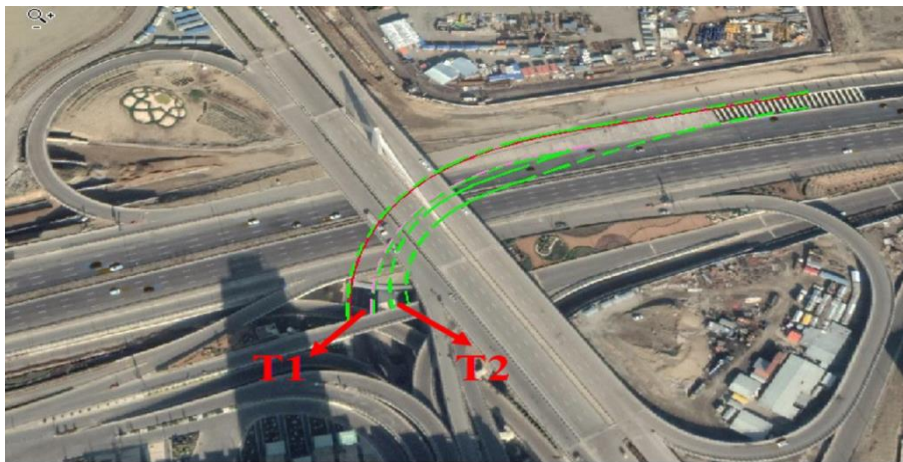
این پژوهش به بررسی تأثیر توالی حفر تونل‌های مجاور می‌پردازد. محل مورد مطالعه تونل‌های دسترسی پروژه‌ی مجموعه ایران مال واقع در منطقه ۲۲ شهر تهران می‌باشد. برای حفاری تونل‌ها از روش تونل‌سازی اتریشی (NATM) استفاده شده است.

در این تحقیق برای سهولت تونل بزرگتر را T1 و تونل کوچکتر را T2 نامگذاری می‌کنیم. از آنجایی که با روش‌های عددی می‌توان تونل را در شرایط متفاوت و پیچیده توده‌خاک و سنگ مدل‌سازی نمود، در نتیجه می‌توان تنش‌ها و جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف تونل‌ها و همچنین نیروها و ممان خمشی وارد بر سیستم نگهداری تونل را با دقت بالایی پیش‌بینی کرد [۴]. به همین علت در این تحقیق برای طراحی و شبیه‌سازی از نرم افزار المان محدود Midas GTS به صورت سه بعدی استفاده می‌شود و تأثیر توالی حفر تونل‌ها بر نیروها و ممان خمشی وارد بر سیستم نگهداری موقت این تونل‌ها و میزان نشست سطحی بررسی می‌شود. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد این پروژه وجود مسیر انحنائی مسیر تونل‌ها می‌باشد که لزوم استفاده از مدل‌سازی سه بعدی را نشان می‌دهد. مهمترین تحقیقات صورت گرفته در این زمینه به قرار زیر است:

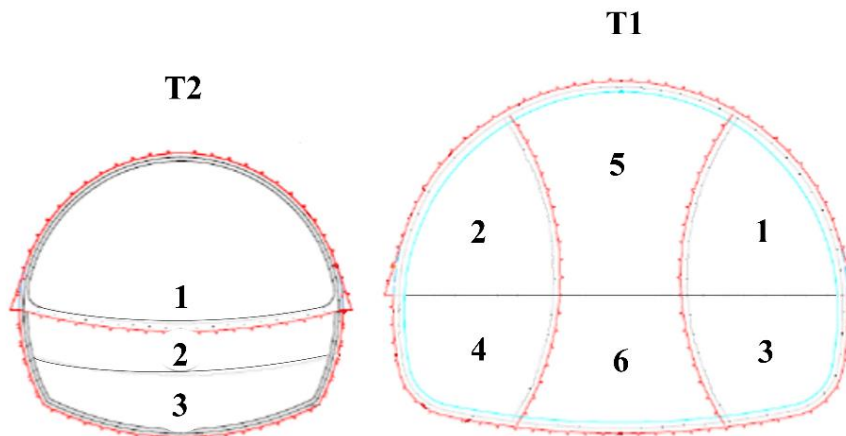
چاحده و شهرور در سال ۲۰۰۷ با استفاده از روش المان محدود، اندرکنش بین دو تونل مجاور را از لحاظ موقعیت نسبی و روش ساخت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر فاصله و توالی حفر بین دو تونل را بر میزان نشست سطحی، نیروها و ممان خمشی وارد بر پوشش تونل‌ها در حالاتی که دو تونل در تراز افقی، تراز مایل و تراز قائم حفر می‌شوند را ارزیابی کردند. به این نتیجه رسیدند که افزایش فاصله بین تونل‌های مجاور سبب کاهش نشست سطح زمین می‌شود.

تونل T1 از روش اتریشی گالری‌های کناری در شش مرحله و برای اجرای تونل T2 از روش طاق و پاتاق استفاده شده است. گام حفاری برای هر مقطع در هر مرحله یک متر می‌باشد و پس از هر متر پیشروی نگهداری موقت تونل که شامل شاتکریت، مش فولادی و لتیس است در فاصله ۱ متری از جبهه کار حفاری، نصب و اجرا می‌شود. در تونل T1 پس از پیشروی گالری‌های کناری به میزان ۳۰ متر، حفاری ستون میانی آغاز شده و سپس مقطع تونل کامل می‌گردد. در تونل T2 نیز حفر قسمت پایینی (bench) بعد ۲۰ متر پیشروی از قسمت بالا (head) آغاز می‌گردد [۸].

امتداد اتوبان همت شرق واقع شده‌اند که در واقع رمپ خروجی از همت غرب به سمت جنوب می‌باشند. با توجه به الزامات پروژه و مشخصات هندسی مسیر، روش اجرای راه دسترسی به مجموعه ایران مال به صورت دو تونل مجاور هم با ابعاد متفاوت و به روش حفر NATM می‌باشد. هندسه این تونل‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است [۸]. با توجه به موقعیت پروژه و محدودیت‌های موجود برای ترافیک مربوط به اتوبان همت، اجرای تونل‌ها به روش کند و پوش (روباز) عملی نبوده و از روش تونل‌سازی اتریشی برای حفر تونل‌ها استفاده شده است. مطابق شکل ۲ در این پروژه، برای اجرای



شکل ۱: پلان مسیر تونل‌های مجموعه ایران مال



شکل ۲: ترتیب حفاری مقاطع مختلف برای دو تونل (عرض و ارتفاع تونل T1 به ترتیب ۱۴/۸ و ۱۱/۵ متر

عرض و ارتفاع تونل T2 به ترتیب ۱۰/۶ و ۹/۳ متر)

همراه با گراول می‌باشد که میزان تحکیم در آن‌ها بالا است. پارامترهای ژئومکانیکی خاک ساختگاه تونل به طور خلاصه در جدول ۱ و مشخصات نگهداری موقت در جدول ۲ ارائه شده است [۸].

### ۳-۱- مشخصات خاک و پوشش موقت تونل‌ها

براساس گزارش مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در محدوده مورد نظر، خاک منطقه غالباً مخروط‌های رس و رس سیلتی

جدول ۱: پارامترهای ژئومکانیکی ساختمان تونل [۹]

| $\Psi(^{\circ})$ | $\nu$       | $\phi(^{\circ})$   | $\rho(\text{kN/m}^3)$ | E(MPa)          | C(kN/m <sup>2</sup> ) |
|------------------|-------------|--------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| زاویه اتساع      | ضریب پواسون | زاویه اصطکاک داخلی | وزن مخصوص             | مدول الاستیسیته | چسبندگی               |
| ۵                | ۰/۲۷        | ۳۵                 | ۲۰                    | ۱۲۰             | ۲۰                    |

جدول ۲: مشخصات نگهداری موقت تونل [۹]

| $\nu$       | $\rho(\text{kN/m}^3)$ | E (GPa)         | نوع نگهداری موقت |
|-------------|-----------------------|-----------------|------------------|
| ضریب پواسون | وزن مخصوص             | مدول الاستیسیته |                  |
| ۰/۲         | ۲۵                    | ۵               | جوان             |
| ۰/۲         | ۲۵                    | ۲۶              | سخت شده          |

- برای مش‌بندی مدل (به حالت سه‌بعدی) و نگهداری (به حالت دوبعدی) از المان هیبریدی (ترکیبی) استفاده شده‌است. ابعاد مش‌ها برای تونل‌ها ثابت و برابر با ۰/۷۵ متر می‌باشد و با فاصله‌گیری از تونل‌ها به سمت مرزهای مدل، ابعاد مش‌ها بزرگتر می‌شود و در مرز پایینی مدل به شش متر نیز رسیده‌است. مطابق شکل ۳ بار سطحی اتوبان همت به صورت بار استاتیکی معادل ۲۰ کیلوپاسکال به سطح بالایی مدل اعمال شده‌است.

برای اعمال شرایط مرزی، مرزهای کف مدل در سه جهت و مرزهای دیواره‌ها در دو جهت x و y ثابت شده‌اند. مرز بالایی نیز به عنوان سطح آزاد در نظر گرفته شده‌است (شکل ۳).  
- مسیر تونل‌ها به صورت منحنی می‌باشد. با این حال طول تونل T1، ۱۲۰ متر و طول تونل T2 برابر با ۱۰۴ متر می‌باشد.

- برای بررسی تأثیر توالی حفر تونل‌ها پنج سناریو مورد بررسی قرار گرفته‌است. این حالات به شرح زیر است:

- حفر دو تونل به صورت همزمان
  - در ابتدا حفر کامل تونل بزرگتر (T1) و سپس حفر تونل کوچکتر (T2)
  - در ابتدا حفر کامل تونل کوچکتر و سپس حفر تونل بزرگتر
  - آغاز حفاری تونل کوچکتر پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل بزرگتر (مطابق شرایط واقعی حفر شده)
  - آغاز حفاری تونل بزرگتر پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل کوچکتر
- نقاطی از تونل‌ها که نیروها و ممان خمشی در آن بررسی شده‌است در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌است.

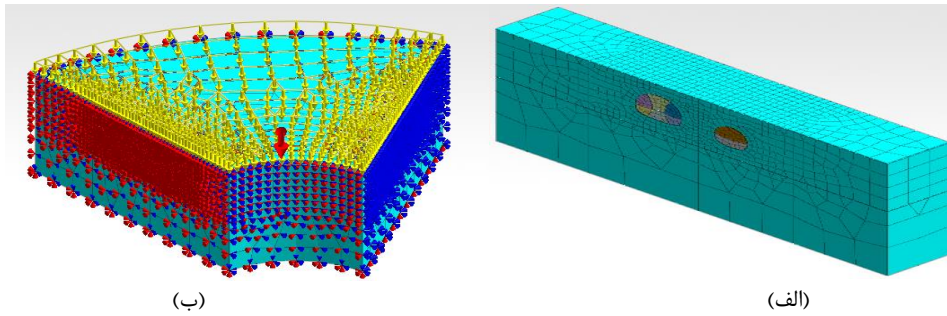
#### ۴ - مدل‌سازی عددی

برای بررسی تأثیر توالی حفر تونل‌ها ۵ سناریو ساخته شد، که در این مدل‌ها تونل‌های مورد مطالعه به طور کامل شبیه‌سازی عددی شدند. شکل ۳ مدل ساخته شده را نشان می‌دهد علت انحنائی بودن هندسه خارجی مدل، انحنائی بودن مسیر حفاری تونل می‌باشد. در این مدل‌ها ترتیب حفاری تونل‌ها تغییر داده شده و تأثیر آن بر نیروها، ممان خمشی و مقدار نشست سطحی در مقطعی که دو تونل کمترین فاصله را دارند، بررسی شده‌است. مشخصات مدل‌های ساخته شده به شرح زیر است:

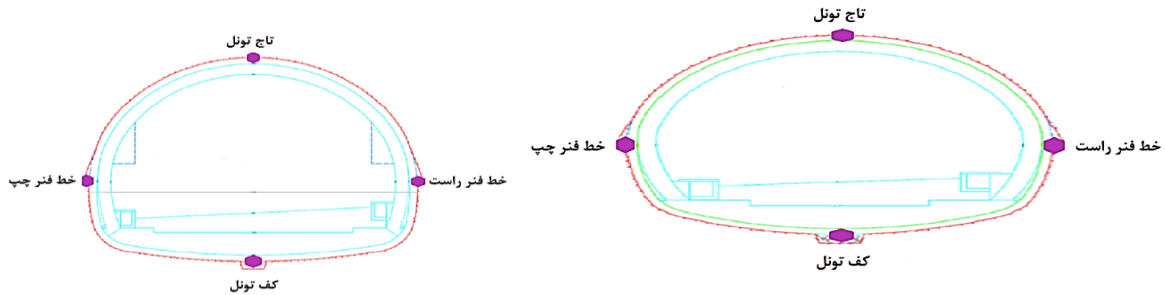
- فاصله مرز مدل از دیواره تونل T1، سه برابر قطر تونل T1 و از دیواره تونل T2، سه برابر قطر تونل T2 می‌باشد. همچنین فاصله مرز پایینی مدل از کف تونل‌ها سه برابر قطر تونل T1 می‌باشد.

- مقدار روباره برای تونل T1 ثابت و برابر با پنج متر و برای تونل T2 میزان روباره از ۶ تا ۱۰/۵ متر متغیر است.

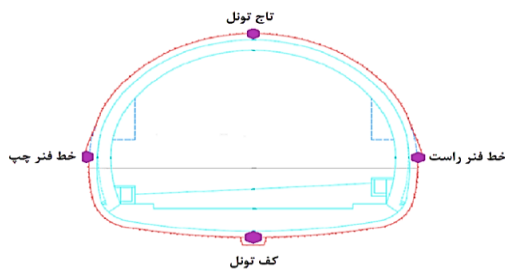
- مدل رفتاری برای خاک اطراف تونل مدل الاستیک پلاستیک کامل با معیار شکست موهر - کلمب و برای سیستم نگهداری موقت با توجه به هدف مسئله مدل الاستیک خطی در نظر گرفته شده‌است. داده‌های ورودی برای محیط اطراف تونل و نگهداری در جداول ۱ و ۲ ارائه شده‌است. نگهداری موقت در فاصله سه متری از جبهه کار اجرا می‌شود که دارای مشخصات شاتکریت موقت جوان می‌باشد. در فاصله ۶ متری از جبهه کار نیز مشخصات شاتکریت سخت به پوشش موقت تونل‌ها اعمال می‌شود.



شکل ۳: هندسه مدل الف) مقطع عرضی تونل‌ها ب) بار سطحی اعمال شده و شرایط مرزی مدل در طول مسیر انحنائی



شکل ۴: نقاط رکورد نیروها و ممان‌های خمشی در تونل T2



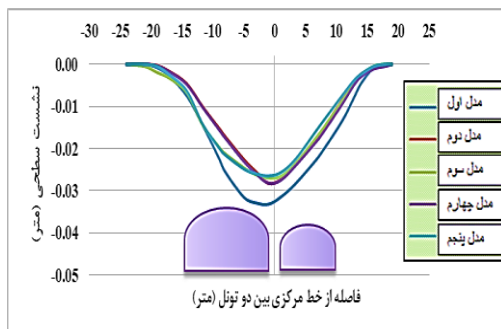
شکل ۵: نقاط رکورد نیروها و ممان‌های خمشی در تونل T1

## ۵ - تفسیر نتایج

### ۵-۱- نتایج تأثیر توالی حفاری حفر تونل‌ها بر میزان نشست‌های سطحی

شکل ۶ پروفیل عرضی نشست سطح زمین را برای ۵ سناریوی عددی بررسی شده، نشان می‌دهد و نتایج حاصل از تأثیر توالی حفاری حفر تونل‌ها بر میزان نشست عرضی سطح زمین به شرح زیر است:

- ماکزیمم مقدار نشست سطحی در مدل اول (حفر همزمان تونل‌ها) برابر با ۳۳ میلی‌متر می‌باشد.
- ماکزیمم مقدار نشست سطحی در مدل دوم (حفر تونل T1 در ابتدا و سپس حفر تونل T2) برابر با ۲۸ میلی‌متر می‌باشد.
- ماکزیمم مقدار نشست سطحی در مدل سوم (حفر تونل T2 در ابتدا و سپس حفر تونل T1) برابر با ۲۷ میلی‌متر می‌باشد.
- ماکزیمم مقدار نشست سطحی در مدل چهارم (آغاز حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T1) برابر با ۲۸ میلی‌متر می‌باشد.
- ماکزیمم مقدار نشست سطحی در مدل پنجم (آغاز حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T2) برابر با ۲۷ میلی‌متر می‌باشد.

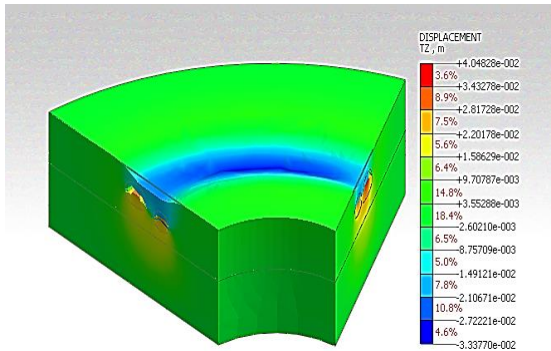


شکل ۶: پروفیل عرضی نشست سطح زمین برای ۵ سناریوی بررسی شده

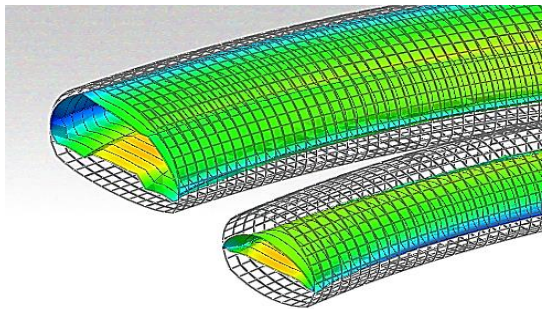
شکل ۷ جایجایی‌های قائم ایجاد شده و شکل ۸ نحوه تغییر شکل پوشش موقت تونل‌ها در حالت حفر همزمان را نشان می‌دهد. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب پروفیل‌های طولی نشست سطح زمین را برای تونل‌های T1 و T2 برای ۵ سناریوی بررسی شده، در یک نمودار نشان می‌دهند و نتایج حاصل از تأثیر توالی حفاری حفر تونل‌ها بر میزان نشست سطحی پروفیل طولی تونل به شرح زیر است:

- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی اول (حفر همزمان تونل‌ها) برای تونل T1، ۲۸ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۲۸ متری از جبهه‌کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.

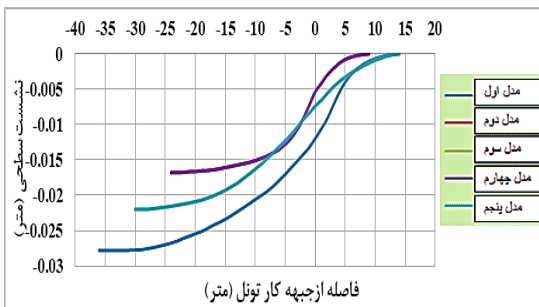
- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی پنجم (آغاز حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T2) برای تونل T2، ۱۵ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۱۴ متری از جبهه کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.



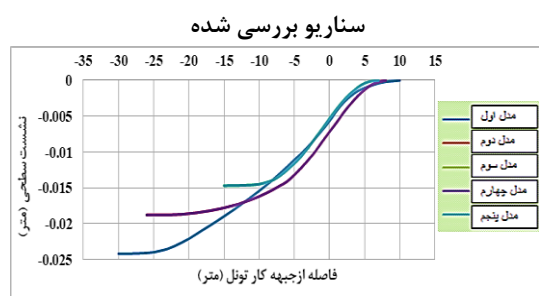
شکل ۷: کانتور جابجایی قائم در حالت حفاری همزمان تونل‌ها



شکل ۸: کانتور تغییر شکل نگهداری موقت تونل‌ها در حالت حفر همزمان



شکل ۹: پروفیل طولی نشست سطح زمین برای تونل T1 در ۵ سناریو بررسی شده



شکل ۱۰: پروفیل طولی نشست سطح زمین برای تونل T2 در ۵ سناریو بررسی شده

- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی دوم (حفار تونل T1 در ابتدا و سپس حفر تونل T2) برای تونل T1، ۱۷ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۲۳ متری از جبهه کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.

- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی سوم (حفار تونل T2 در ابتدا و سپس حفر تونل T1) برای تونل T1، ۲۲ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۲۶ متری از جبهه کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.

- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی چهارم (آغاز حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T1) برای تونل T1، ۱۷ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۲۳ متری از جبهه کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.

- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی پنجم (آغاز حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T2) برای تونل T1، ۲۲ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۲۶ متری از جبهه کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.

- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی اول (حفار همزمان تونل‌ها) برای تونل T2، ۲۴ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۲۸ متری از جبهه کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.

- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی دوم (حفار تونل T1 در ابتدا و سپس حفر تونل T2) برای تونل T2، ۱۹ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۲۴ متری از جبهه کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.

- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی سوم (حفار تونل T2 در ابتدا و سپس حفر تونل T1) برای تونل T2، ۱۵ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۱۴ متری از جبهه کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.

- مقدار ماکزیمم نشست طولی سطح در سناریوی چهارم (آغاز حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T1) برای تونل T2، ۱۹ میلی‌متر می‌باشد و در فاصله ۲۴ متری از جبهه کار مقدار نشست در سطح زمین ثابت شده است.

## ۵-۲- تحلیل تأثیر توالی حفر تونل‌ها بر نیروها و

### ممان خمشی

جدول‌های ۳ تا ۷ مقادیر نیروها و لنگرهای خمشی در بخش‌های مختلف پوشش موقت تونل‌های T1 و T2 را در مقطعی از حفاری که دو تونل کمترین فاصله را با یکدیگر دارند نشان می‌دهند. بر این اساس:

- مقادیر نیروی محوری و ممان خمشی در حالتی که ابتدا تونل T1 و سپس تونل T2 حفاری شده، نسبت به حالتی که تونل‌ها همزمان حفاری شده‌اند، در تمام نقاط بررسی شده تونل T1 افزایش و تونل T2 کاهش دارد.

- مقادیر نیروی برشی در حالتی که ابتدا تونل T1 و سپس تونل T2 حفاری شده، نسبت به حالتی که تونل‌ها همزمان حفاری شده‌اند، در تمام نقاط بررسی شده تونل T1 و تونل T2 کاهش دارد.

- مقادیر نیروی محوری و ممان خمشی در حالتی که ابتدا تونل T2 و سپس تونل T1 حفاری شده، نسبت به حالتی که تونل‌ها همزمان حفاری شده‌اند، در تمام نقاط بررسی شده تونل T1 کاهش و تونل T2 افزایش دارد.

- مقادیر نیروی برشی در حالتی که ابتدا تونل T2 و سپس تونل T1 حفاری شده، نسبت به حالتی که تونل‌ها همزمان حفاری شده‌اند، در تمام نقاط بررسی شده تونل T1 و تونل T2 کاهش دارد.

- مقادیر نیروی محوری و ممان خمشی در حالتی که حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T1 آغاز شده، نسبت به حالتی که تونل‌ها همزمان حفر

شده‌اند، در تمام نقاط بررسی شده تونل T1 افزایش و تونل T2 کاهش دارد.

- مقادیر نیروی برشی در حالتی که حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T1 آغاز شده، نسبت به حالتی که تونل‌ها همزمان حفاری شده‌اند، در تمام نقاط بررسی شده تونل T1 و تونل T2 کاهش دارد.

- مقادیر نیروی محوری، نیروی برشی و ممان خمشی در حالتی که حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T1 آغاز شده، نسبت به حالتی که ابتدا تونل T1 و سپس تونل T2 حفاری شده است، در تمام نقاط تونل‌های T1 و T2 به مقدار بسیار اندکی افزایش دارد.

- مقادیر نیروی محوری و ممان خمشی در حالتی که حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T2 آغاز شده، نسبت به حالتی که تونل‌ها همزمان حفاری شده‌اند، در تمام نقاط بررسی شده تونل T1 کاهش و تونل T2 افزایش دارد.

- مقادیر نیروی برشی در حالتی که حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T2 آغاز شده، نسبت به حالتی که تونل‌ها همزمان حفاری شده‌اند، در تمام نقاط بررسی شده تونل T1 و تونل T2 کاهش دارد.

- مقادیر نیروی محوری، نیروی برشی و ممان خمشی در حالتی که حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T2 آغاز شده، نسبت به حالتی که ابتدا تونل T2 و سپس تونل T1 حفاری شده است، در تمام نقاط تونل‌های T1 و T2 به مقدار بسیار اندکی افزایش دارد.

جدول ۳: نیروها و ممان خمشی اعمال شده به نگهداری موقت در بخش‌های مختلف تونل (سناریوی اول - حفر همزمان تونل‌ها)

| مقطع                     | بخش‌های مختلف پوشش | نیروی محوری kN | ممان خمشی kN.m | نیروی برشی kN |
|--------------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------|
| تونل با مقطع بزرگتر (T1) | بخش میانی تاق      | ۲۷۵            | ۳/۵۸           | ۴/۳۴          |
|                          | دیواره راست        | ۸۵۱            | ۶/۲۹           | ۴۲/۴۸         |
|                          | دیواره چپ          | ۸۰۱            | ۱/۵۵           | ۱۱/۶۵         |
|                          | بخش میانی کف       | ۹۶             | ۸/۶۵           | ۳/۸           |
| تونل با مقطع کوچکتر (T2) | بخش میانی تاق      | ۳۴۱            | ۱/۹۵           | ۷/۰۴          |
|                          | دیواره راست        | ۵۱۷            | ۲/۵۲           | ۱۴/۳۲         |
|                          | دیواره چپ          | ۱۱۴۳           | ۱۹/۲۱          | ۳۷/۱۳         |
|                          | بخش میانی کف       | ۴۴۷            | ۲/۰۳           | ۱/۱۷          |

جدول ۴: نیروها و ممان خمشی اعمال شده به نگهداری موقت در بخش‌های مختلف تونل (سناریوی دوم - حفر تونل T1 در ابتدا و سپس حفر تونل T2)

| مقطع                     | بخش‌های مختلف پوشش | نیروی محوری kN | ممان خمشی kN.m | نیروی برشی kN |
|--------------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------|
| تونل با مقطع بزرگتر (T1) | بخش میانی تاق      | ۴۷۹            | ۸/۴۲           | ۳/۸۴          |
|                          | دیواره راست        | ۱۶۳۴           | ۳۸/۷۱          | ۳۴/۶۳         |
|                          | دیواره چپ          | ۸۴۲            | ۴/۸۸           | ۹/۴۷          |
| تونل با مقطع کوچکتر (T2) | بخش میانی کف       | ۴۰۱            | ۹/۴۵           | ۲/۷۰          |
|                          | بخش میانی تاق      | ۲۸۶            | ۱/۳۹           | ۰/۷۳          |
|                          | دیواره راست        | ۴۰۳            | ۱/۷۷           | ۱۴/۳۲         |
|                          | دیواره چپ          | ۳۴۹            | ۰/۸۶           | ۹/۱۷          |
|                          | بخش میانی کف       | ۱۶۴            | ۱/۳۱           | ۰/۲۹          |

جدول ۵: نیروها و ممان خمشی اعمال شده به نگهداری موقت در بخش‌های مختلف تونل (سناریوی سوم - حفر تونل T2 در ابتدا و سپس حفر تونل T1)

| مقطع                     | بخش‌های مختلف پوشش | نیروی محوری kN | ممان خمشی kN.m | نیروی برشی kN |
|--------------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------|
| تونل با مقطع بزرگتر (T1) | بخش میانی تاق      | ۲۷۴            | ۳/۳۳           | ۳/۱۱          |
|                          | دیواره راست        | ۸۳۵            | ۵/۱۷           | ۹/۲۴          |
|                          | دیواره چپ          | ۷۷۷            | ۱/۴۷           | ۸/۱۶          |
| تونل با مقطع کوچکتر (T2) | بخش میانی کف       | ۹۰             | ۸/۶۲           | ۱/۷۰          |
|                          | بخش میانی تاق      | ۴۱۹            | ۲/۸۴           | ۶/۴۲          |
|                          | دیواره راست        | ۶۳۰            | ۲/۹۵           | ۱۴/۵۰         |
|                          | دیواره چپ          | ۱۲۰۷           | ۲۰/۶۹          | ۳۱/۸۴         |
|                          | بخش میانی کف       | ۴۶۳            | ۳/۸۸           | ۱/۱۳          |

جدول ۶: نیروها و ممان خمشی اعمال شده به نگهداری موقت در بخش‌های مختلف تونل (سناریوی چهارم - آغاز حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T1)

| مقطع                     | بخش‌های مختلف پوشش | نیروی محوری kN | ممان خمشی kN.m | نیروی برشی kN |
|--------------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------|
| تونل با مقطع بزرگتر (T1) | بخش میانی تاق      | ۴۸۴            | ۹/۷۹           | ۴/۱۲          |
|                          | دیواره راست        | ۱۶۵۲           | ۲۸/۸۴          | ۳۵/۲۰         |
|                          | دیواره چپ          | ۸۷۰            | ۵/۰۲           | ۱۰/۸۴         |
| تونل با مقطع کوچکتر (T2) | بخش میانی کف       | ۴۲۳            | ۱۰/۴۳          | ۲/۸۰          |
|                          | بخش میانی تاق      | ۲۹۰            | ۱/۳۹           | ۰/۷۴          |
|                          | دیواره راست        | ۴۰۷            | ۱/۷۹           | ۱۴/۴۹         |
|                          | دیواره چپ          | ۳۵۴            | ۰/۸۹           | ۹/۴۹          |
|                          | بخش میانی کف       | ۱۶۷            | ۱/۳۱           | ۰/۳۱          |

جدول ۷: نیروها و ممان خمشی اعمال شده به نگهداری موقت در بخش‌های مختلف تونل (سناریوی پنجم - آغاز حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متر پیشروی برای تونل T2)

| مقطع                     | بخش‌های مختلف پوشش | نیروی محوری kN | ممان خمشی kN.m | نیروی برشی kN |
|--------------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------|
| تونل با مقطع بزرگتر (T1) | بخش میانی تاق      | ۲۷۴            | ۳/۳۳           | ۳/۱۱          |
|                          | دیواره راست        | ۸۳۵            | ۵/۱۸           | ۹/۲۵          |
|                          | دیواره چپ          | ۷۷۷            | ۱/۴۷           | ۸/۱۶          |
| تونل با مقطع کوچکتر (T2) | بخش میانی کف       | ۹۰             | ۸/۶۳           | ۱/۷۳          |
|                          | بخش میانی تاق      | ۴۲۰            | ۲/۸۶           | ۶/۳۲          |
|                          | دیواره راست        | ۶۳۷            | ۲/۹۸           | ۱۴/۵۵         |
|                          | دیواره چپ          | ۱۲۰۸           | ۲۰/۷۲          | ۳۱/۸۹         |
|                          | بخش میانی کف       | ۴۶۸            | ۳/۸۹           | ۱/۱۶          |



### ۵-۳- نتایج تأثیر توالی حفار تونل‌ها بر میزان جابجایی‌های ایجاد شده در جداره تونل

جدول ۸ میزان جابجایی‌های ایجاد شده در نقاط مختلف تونل برای ۵ سناریوی بررسی شده را نشان می‌دهد. براساس نتایج می‌توان گفت که در حفار تونل‌های مجاور به صورت متوالی، تغییر چشمگیری در جابجایی‌های ایجاد شده در

دیواره‌ها، تاج و کف تونلی که در ابتدا حفار می‌شود نسبت به جابجایی‌های ایجاد شده در حفار همزمان تونل‌ها دیده نمی‌شود. همچنین در تونلی که پس از تونل اول حفار شده است، در دیواره‌ای از تونل که در مجاورت تونل کناری قرار دارد، افزایش جابجایی‌ها مشاهده می‌شود و در سایر نقاط تغییر چشمگیری ایجاد نمی‌شود. جابجایی‌های ایجاد شده در دیواره‌ها، تاج و کف هر دو تونل در حفاری با فاصله‌ی زمانی تونل‌ها تقریباً مشابه حفاری متوالی می‌باشد.

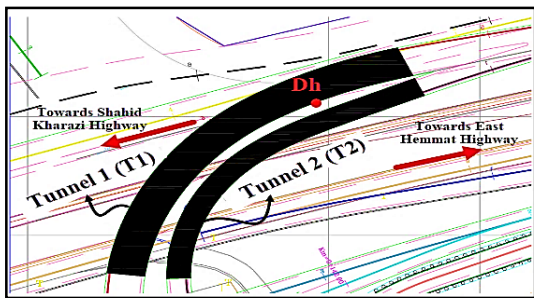
جدول ۸: میزان جابجایی‌های ایجاد شده در نقاط مختلف تونل T1 و تونل T2

| میزان جابجایی کل در بخش‌های مختلف تونل (میلیمتر) |         |         |           |          | مقطع                     | بخش‌های مختلف پوشش |
|--|---------|---------|-----------|----------|--------------------------|--------------------|
| مدل اول  | مدل دوم | مدل سوم | مدل چهارم | مدل پنجم |                          |                    |
| ۲۳   | ۲۳/۴    | ۲۰/۶    | ۲۳/۲۰     | ۲۰/۸۰    | تونل با مقطع بزرگتر (T1) | بخش میانی تاق      |
| ۱۰   | ۹/۷     | ۱۴      | ۹/۴۰      | ۱۳/۸۰    |                          | دیواره راست        |
| ۶/۸۰   | ۶/۹۰    | ۶/۳۰    | ۷         | ۶/۱۰     |                          | دیواره چپ          |
| ۳۸/۱   | ۳۸/۴    | ۳۷/۹۰   | ۳۸/۴۰     | ۳۸       | تونل با مقطع کوچکتر (T2) | بخش میانی کف       |
| ۲۳/۵   | ۲۱/۱    | ۲۴      | ۲۱/۲۰     | ۲۳/۸۰    |                          | بخش میانی تاق      |
| ۵  | ۴/۲۰    | ۴/۶۰    | ۴/۹۰      | ۴/۶۰     |                          | دیواره راست        |
| ۸  | ۱۶/۹    | ۸/۱۰    | ۱۶/۹۰     | ۸        |                          | دیواره چپ          |
| ۳۲/۵   | ۳۳      | ۳۱/۹۰   | ۳۲/۸۰     | ۳۲       |                          | بخش میانی کف       |

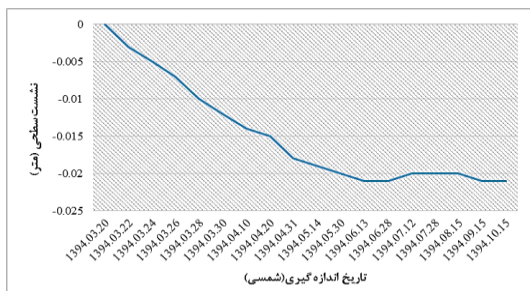
در هر دو روش نزدیک به هم می‌باشد. ماکزیمم نشست سطحی روش عددی ۲۷ میلیمتر می‌باشد که با نتایج مانیتورینگ اختلاف حدود ۵ میلیمتر دارند.

### ۵-۴- اعتبار سنجی نشست سطحی زمین با داده‌های مانیتورینگ

در نهایت جهت اعتبارسنجی نشست‌های منتج از روش عددی، از داده‌های مانیتورینگ نشست سطحی مسیر تونل ایران مال استفاده شد. در شکل ۱۱ موقعیت نقطه Dh (طول ۲۰۲/۵ متری) که در آن نشست سطحی زمین اندازه‌گیری شده‌است مشخص می‌باشد و در شکل ۱۲ مقادیر نشست سطحی حاصل از مانیتورینگ سطح زمین در موقعیت موردنظر در روزهای مختلف ارائه شده‌است، که ماکزیمم نشست سطحی در حدود ۲۲ میلیمتر می‌باشد. این نتایج با توجه به حفار ۴۰ متر تونل بزرگتر و سپس تونل کوچکتر مطابق واقعیت حاصل شده‌است و در نتیجه باید با شرایط سناریوی ۴ در مدل عددی مقایسه گردد. در حفاری NATM، سه ناحیه در ارتباط با حرکت زمین در مقابل حفاری وجود دارد. حرکت در ناحیه جبهه‌کار تونل، حرکت در اطراف جداره‌ی تونل و حرکت در قسمت دور از سینه کار ناشی از تحکیم بلند مدت می‌باشد [۱۰]. همانطور که پیش‌تر نشان داده شد، شکل ۶ ماکزیمم نشست سطحی روش عددی در سناریوی های مختلف را نشان می‌دهد. ماکزیمم نشست



شکل ۱۱- پلان مسیر تونل و موقعیت نقطه Dh جهت مانیتورینگ نشست سطحی زمین



شکل ۱۲- تاریخچه نشست سطحی زمین در پروژه ایران مال برای موقعیت ۲۰۲/۵ متری

## ۶ - نتیجه‌گیری

- در حفر متوالی یا با فاصله تونل‌های مجاور (سناریوهای دوم تا پنجم) نتایج پس از اتمام حفاری هر دو تونل نشان می‌دهند که مقادیر نیروی محوری و ممان خمشی در تونلی که حفاری آن در ابتدا اجرا می‌شود نسبت به حفر همزمان تونل‌ها افزایش و در تونلی که حفاری آن بعد از حفر تونل اول انجام می‌گیرد، کاهش دارد. همچنین نیروی برشی نیز در تمام حالات بررسی شده نسبت به حفر همزمان تونل‌ها کاهش دارد. نتایج حفر با فاصله ۴۰ متری اجرای تونل‌ها نیز تقریباً مشابه حفر متوالی تونل‌ها می‌باشد.

- جابجایی‌های ایجاد شده در دیواره‌های مجاور دو تونل مجاور به هم در حالت حفر متوالی یا با فاصله نسبت به حفر همزمان تونل‌ها افزایش دارد و در سایر نقاط تغییر چندانی نشان نمی‌دهد.

## مراجع

- [1] S. Akbari, Sh. Zare, H. Mirzaei Nasirabad. (2014), "Evaluation of Interaction between Line 1 Twin Tunnels of Tabriz Metro Using 3D Numerical Modelling". Scientific and Research Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, pp. 5-39.
- [2] Mirhabibi, A., Soroush, A. (2012), "Effects of surface buildings on twin tunneling-induced ground settlements." Tunneling and Underground Space Technology Volume 29, 40-51.
- [3] Tafraouti, Nouaman, Benamar, Rhali, Lamdouar, (2016), "Nouzha Study of the Interaction between Two Parallel Tunnels in the Case where the Second Tunnel is excavated after the Construction of the First Tunnel." International Journal of Applied Engineering Research, Volume 11, pp. 10624-10633.
- [4] Ramesh, A., Hajihassani, M., Rashidell, A. (2020), "Ground Movements Prediction in Shield-Driven Tunnels using Gene Expression Programming." The Open Construction & Building Technology Journal, Volume 14, Issues Suppl-2, M4, Page 286-297.
- [5] Hage Chehade, F., Shahrou, I. (2008), "Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure." Tunneling and Underground Space Technology Volume 23, 210-214.
- [6] Chakeri, H., Hasanpour, R., Hindistan, M. A., & Ünver, B. (2011), "Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling." Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70(3), 439-448. Doi: 10.1007/s10064-010-0333-8.
- [7] M. Mahdi. N. Shariatmadari. (2014), "Construction Procedures Evaluation of Three Adjacent Tunnels and Excavation Step Effects." World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Volume: 8, No: 1.

در این پژوهش به بررسی تأثیر توالی حفر تونل‌های مجاور هم پرداخته شد و محل مورد مطالعه تونل‌های دسترسی مجموعه ایران مال واقع در منطقه ۲۲ شهر تهران بود. در این تحقیق برای طراحی و شبیه‌سازی از نرم افزار المان محدود Midas GTS به صورت سه بعدی استفاده شد و تأثیر توالی حفر تونل‌ها بر نیروهای محوری و برشی و ممان خمشی وارد بر سیستم نگهداری موقت این تونل‌ها و میزان نشست سطحی بررسی شد. نتایج عمده به شرح زیر می‌باشد:

- ماکزیمم مقدار نشست عرضی سطح زمین در سناریوی دوم (حفر تونل T1 در ابتدا و سپس حفر تونل T2) و سناریوی چهارم (آغاز حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متری پیشروی برای تونل T1) مقدار ۱۵ درصد نسبت به حفر همزمان تونل‌ها کاهش دارد.

- ماکزیمم مقدار نشست عرضی سطح زمین در سناریوی سوم (حفر تونل T2 در ابتدا و سپس حفر تونل T1) و سناریوی پنجم (آغاز حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متری پیشروی برای تونل T2) مقدار ۱۸ درصد نسبت به حفر همزمان تونل‌ها کاهش دارد.

- ماکزیمم مقدار نشست طولی سطح زمین در سناریوی دوم (حفر تونل T1 در ابتدا و سپس حفر تونل T2) و سناریوی چهارم (آغاز حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متری پیشروی برای تونل T1) مقدار ۳۹ درصد نسبت به حفر همزمان تونل‌ها کاهش دارد.

- ماکزیمم مقدار نشست طولی سطح زمین در سناریوی دوم (حفر تونل T1 در ابتدا و سپس حفر تونل T2) و سناریوی چهارم (آغاز حفاری تونل T2 پس از ۴۰ متری پیشروی برای تونل T1) مقدار ۲۱ درصد نسبت به حفر همزمان تونل‌ها کاهش دارد.

- ماکزیمم مقدار نشست طولی سطح زمین در سناریوی سوم (حفر تونل T2 در ابتدا و سپس حفر تونل T1) و سناریوی پنجم (آغاز حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متری پیشروی برای تونل T2) مقدار ۲۱ درصد نسبت به حفر همزمان تونل‌ها کاهش دارد.

- ماکزیمم مقدار نشست طولی سطح زمین در سناریوی سوم (حفر تونل T2 در ابتدا و سپس حفر تونل T1) و سناریوی پنجم (آغاز حفاری تونل T1 پس از ۴۰ متری پیشروی برای تونل T2) مقدار ۳۸ درصد نسبت به حفر همزمان تونل‌ها کاهش دارد.

[10] Rashidell, A., Kharghani, M., Dias, D., & Hajihassani, M. 2020, "Numerical study of the segmental tunnel lining behavior under a surface explosion – Impact of the longitudinal joints shape." *Computers and Geotechnics*, 128,103822.doi:<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.103822>

[8] "Report on the design of the primary and final structures of the access tunnels of Iran Mall Collection". Amod Rah Company, 1395. (In Persian)

[9] Pirnia, Farshid. (2017), "Numerical modeling of the Interaction of Two Adjacent Tunnels in Urban Areas (Case Study: Iran Mal Collection Access Tunnels)." Master's Thesis, Imam Khomeini International University.

---

\ New Austrian Tunneling Method