

### تحلیل پارامتری اندرکنش بین تونل‌های موازی و زمین اطراف با تکیه بر موقعیت نسبی و روند حفاری آن‌ها (مطالعه موردی: برای تونل‌های ساخته شده در محیط شهری شیراز)

پژوهشی

کوروش شهريار<sup>۱\*</sup>؛ مهدی آرش<sup>۲</sup>؛ محمدرضا فرجی تيله نوئی<sup>۳</sup>

۱- استاد؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، k.shahriar@aut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، m75.arash@aut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، mrfaraji75@aut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۹/۰۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷

شماره صفحات: ۲۱۵ تا ۲۲۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.11441.1440

#### چکیده

#### واژگان کلیدی

توسعه صنعت حمل و نقل باعث ساخت تونل‌هایی در همسایگی هم شده است. این تونل‌ها به طور موازی در کنار هم قرار می‌گیرند یا به طور متقاطع غیر هم سطح ساخته می‌شوند. محل قرارگیری این تونل‌ها نسبت به یک دیگر و روند حفاری آن‌ها در توزیع تنش اطراف تونل‌ها و روی رفتار زمین تاثیر گذار است. عدم درک مناسب رفتار سازه‌های مجاور می‌تواند منجر به بروز حوادث جبران ناپذیر شود. به همین دلیل مطالعه این سازه‌ها امری ضروری است. هدف از انجام مطالعه بررسی کامل تاثیر حفاری تونل‌های موازی بر نیروهای القایی وارد بر پوشش نگهداری تونل اول و نشست سطح زمین به منظور شناخت رفتار سازه‌های مجاور می‌باشد. در این مقاله با استفاده از روش اجزا محدود پلکسیس دو بعدی این تحلیل‌ها انجام شده است. طبق

تحلیل پارامتری  
تونل‌سازی  
نشست سطحی  
لنگر خمشی  
نیروی محوری  
پلکسیس دو بعدی  
اندرکنش

نتایج به دست آمده با افزایش فاصله افقی بین دو تونل، مقدار نشست سطحی کاهش می‌یابد در حالی که با افزایش فاصله قائم بین تونل‌ها مقدار نشست سطحی افزایش یافته است. همچنین افزایش عمق تونل دوم باعث افزایش بار القایی و لنگر خمشی بر روی پوشش نگهداری تونل اول شده است. افزایش فاصله قائم باعث تغییرات بیش‌تری نسبت به افزایش فاصله افقی بین دو تونل روی موارد خروجی مورد نظر دارد.

#### ۱- پیش‌گفتار

(Ashtiani, 2016). گسترش شهرها و افزایش جمعیت باعث بوجود آمدن مشکلات حمل و نقلی شده است. به همین دلیل مهندسان به دلیل کمبود فضاهای سطحی به سمت استفاده از فضاهای زیرسطحی تمایل دارند (Faez, 2014). تونل‌های مترو و تونل‌های ترافیکی از مهم‌ترین این فضاها در محیط‌های شهری هستند (Guglielmetti, et al., 2008).

در شهرهای بزرگ توجه به سیستم حمل و نقل و توسعه آن یک امر ضروری تلقی می‌شود. توسعه پایدار شهری با رویکرد استفاده بهینه از فضاهای زیرزمینی به منظور مقابله با کمبود فضاهای سطحی و برطرف نمودن مسائل حمل و نقلی یکی از رهیافت‌های نوین در زمینه شهرسازی است (Ajorloo &

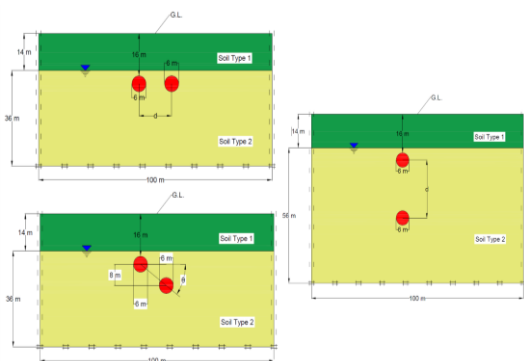
برای ساخت این فضاها همواره نیاز به حفاری‌های جانبی است. به همین دلیل مشکلات می‌تواند دوچندان شود. اندرکنش ایجاد شده در اثر حفاری تونل‌های مجاور به طور کلی وابسته به فاصله بین دو تونل، ابعاد تونل‌ها و صلبیت پوشش آن‌ها می‌باشد. به همین دلیل روش حفر مناسب و پیش‌بینی رفتار سازه دو تونل و زمین اطراف امری حیاتی است تا جلوی خسارات احتمالی گرفته شود (Asnavandi, et al., 2012). تحلیل این اندرکنش به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی تعامل خاک و سازه مشکل است (Zhang, et al., 2018). نشست سطحی در منطقه، بار مجاز وارد بر پوشش نگهداری تونل‌ها و تغییر شکل‌های مجاز در دیواره‌های تونل از مهم‌ترین ملاحظات در طراحی و اجرای این چنین پروژه‌هایی می‌باشد (Hosseinzadeh, 2014).

مدل‌سازی عددی از جمله روش‌هایی است که برای بررسی این مسائل قبل از حفاری بکار گرفته می‌شود. مشاهدات میدانی نیز برای تجزیه و تحلیل اندرکنش این تونل‌ها بر یک دیگر و زمین اطراف آن‌ها در حین حفاری و پس از آن بکار گرفته شده است. تحلیل‌هایی که توسط افراد مختلف طی سالیان گذشته انجام شده است نشان می‌دهد که اندرکنش بین تونل‌ها و زمین اطراف می‌تواند تا حد زیادی روی نیروهای وارد بر پوشش تونل و همین‌طور نشست سطحی تاثیرگذار باشد. همچنین هنگامی که تونل جدید از همسایگی تونل موجود عبور می‌کند تاثیر آن روی پوشش نگهداری تونل موجود قابل توجه است (Kawata, et al., 1993 (Saitoh, et al., 2008 (Liu, et al., 1995 (Shalabi, et al., 2016). موقعیت نسبی دو تونل نسبت به یک دیگر و فاصله زمانی عملیات حفاری آن‌ها می‌تواند روی نیروهای وارد بر پوشش تونل‌ها و جابجایی خاک اطراف آن‌ها تاثیرگذار باشد. از طرفی به دلیل حفاری، خاک اطراف دچار تراکم می‌شود. این نسبت تراکم خاک باعث ایجاد تغییراتی در اندرکنش بین تونل‌های موازی می‌شود به طوری که با کاهش این نسبت تراکم اثر متقابل بین دو تونل افزایش می‌یابد (Shalabi, 2004 (Shalabi, 2005 (Shalabi, et al., 2017 (Shalabi & Mroueh, 1997 (Shalabi, et al., 2012 (Shalabi & Cording, 2005).

به طور جزئی‌تر در پروژه‌های مشابه، چاکری و حسن پور تغییرات توزیع تنش، جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها و نشست سطحی را در تقاطع بین تونل خط چهار متروی تهران با تونل توحید بررسی کرده‌اند. در این تحقیق تاثیر فاصله بین دو محور تونل توحید بر نشست سطحی ارزیابی شده است (Chakeri, et al., 2011). لای و همکاران به بررسی تونل‌های متقاطع غیر هم سطح با زاویه تقاطع کم پرداختند. اطلاعات رفتارسنجی نشان می‌دهد که تغییر شکل تونل اولیه در اثر حفر تونل دوم که به طور مورب از زیر آن عبور می‌کند علاوه بر ایجاد نشست عمودی باعث تغییر شکل پیچشی در آن نیز می‌شود (Lai, et al., 2020). حسینی نیز محل تقاطع غیر هم سطح تونل‌های خط سه و هفت متروی تهران را بررسی کرده است. طبق نتایج با نزدیک شدن ماشین حفر به محل تقاطع و با عبور انتهای سپر ماشین حفر از محل مورد نظر مقدار نشست سطحی روندی افزایشی داشته است (Hosseini & Shahriar, 2012). معادیکخواه با کمک مدل‌سازی عددی تاثیر حفاری تونل خط متروی تهران را بر تونل فاضلاب شرق تهران بررسی کرده است. در این بررسی با نزدیک شدن تونل مترو به تونل فاضلاب، باعث افزایش میزان نشست تونل فاضلاب و تنش‌های القایی در آن شده است (Maadikhah & Zare, 2012). لیو اندرکنش بین تونل‌های متقاطع غیر هم سطح در سیدنی را با تمرکز بر اثر حفاری بر پوشش تونل موجود با نصب ابزار دقیق انجام داده است (Liu, et al., 2009).

ژانگ در ابعادی بزرگ‌تر به بررسی تونل‌های دو قلوئی مترو پرداخته است. در این مطالعه، رفتار تونل‌های دو قلوئی مترو در اثر ساخت یک ایستگاه مترو در زیر این تونل‌ها بررسی شده است (Zhang, et al., 2018). وانگ نیز اثر حفر تونل‌های موازی را بر یک دیگر با کمک روش عددی و روش‌های تحلیلی مورد ارزیابی قرار دادند. که در این مطالعه اثر زاویه محوری بین دو تونل و ابعاد آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت (Wang, et al., 2020). افشانی و همکاران نیز به مانند وانگ اثر حفاری تونل‌های موازی را مورد بررسی قرار دادند با این تفاوت که در این مطالعه تونل‌های مورد نظر به جای مقطع دایروی، مقطع بیضوی دارند (Afshani, et al.,

خط محوری مایل و قائم در نظر گرفته شده است. قطر درونی تونل‌ها برابر با ۶ متر و ضخامت سگمنت‌های آن برابر ۳۰ سانتی‌متر لحاظ شده است. سطح آب زیرزمینی نیز در کلیه مدل‌های ساخته شده برابر ۱۴ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۲، هندسه مدل‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- هندسه مدل‌های ساخته شده

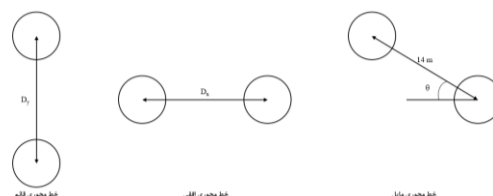
خاک محدوده مورد نظر از مدل رفتاری خاک سخت شونده تبعیت می‌کند و رفتاری الاستیک دارد. عملیات حفاری با حذف اجزای خاکی درون تونل و فعال کردن پوشش آن انجام می‌شود. برای طراحی و تحلیل این مطالعه از پارامترهای خط ۲ متروی شیراز - ایران استفاده شده است. جدول ۱، مقایسه مدل‌های ساخته شده، جدول ۲ و جدول ۳ خواص خاک منطقه و سگمنت را نشان می‌دهند.

جدول ۱- مقایسه مدل‌های ساخته شده

| پارامتر مورد مقایسه                | خط اتصال افقی | خط اتصال قائم | خط اتصال مایل |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| طول خط اتصال (متر)                 | ۲۴، ۱۹، ۱۴    | ۲۴، ۱۹، ۱۴    | ۱۴            |
| زاویه خط اتصال با محور افقی (درجه) | ۰             | ۹۰            | ۳۶، ۱۸، ۰     |
| روند حفاری                         | هم زمان       | هم زمان       | هم زمان       |
| قطر تونل (متر)                     | ۶             | ۶             | ۶             |
| ضخامت سگمنت (متر)                  | ۰/۳           | ۰/۳           | ۰/۳           |
| تعداد مدل ساخته شده                | ۱۲            | ۱۲            | ۱۲            |

از دیگر مطالعات شاخص در این زمینه می‌توان به مطالعه لین و همکاران در خصوص تحلیل رفتاری تونل در اثر عبور تونلی با زاویه تقاطع کم در زیر آن اشاره کرد که با کاهش زاویه تقاطع بین دو تونل متقاطع غیر هم سطح تغییر شکل نامتقارن در تونل موجود در محل افزایش می‌یابد (Lin, et al., 2019).

از جمله عواملی که در اندرکنش بین تونل‌های موازی تاثیر گذار هستند می‌توان به افت حجمی و همگرایی تونل قبل از نصب سگمنت، روند حفاری آن‌ها و موقعیت نسبی آن‌ها نسبت به یک دیگر اشاره کرد. در این مقاله، اندرکنش بین تونل‌های موازی به منظور شناخت رفتار متقابل آن‌ها به طور پارامتریک با کمک نرم افزار پلکسیس دو بعدی با چشم پوشی بر افت حجمی و همگرایی آن‌ها بررسی شده است. نشست سطحی و نیروی القایی محوری وارد شده بر پوشش تونل‌ها و لنگر خمشی وارد بر آن مواردی هستند که در این مقاله به آن‌ها پرداخته شده است. علاوه بر این موارد پارامترهای دیگری را مانند اثر نیروی برشی نیز می‌توان در نظر گرفت. این مطالعات وقتی خط اتصال مرکز دو تونل (خط محوری) در راستای افقی، قائم و مایل قرار گرفته باشند در دو حالت حفاری هم زمان و غیر هم زمان انجام شده است. شکل ۱، وضعیت شماتیک قرارگیری هر یک از این سه حالت را نشان می‌دهد.

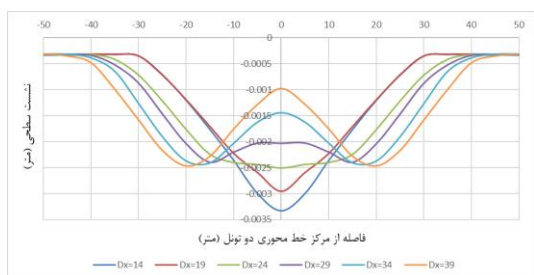


شکل ۱- شماتیک مدل‌های مورد مطالعه

## ۲- مدل‌سازی

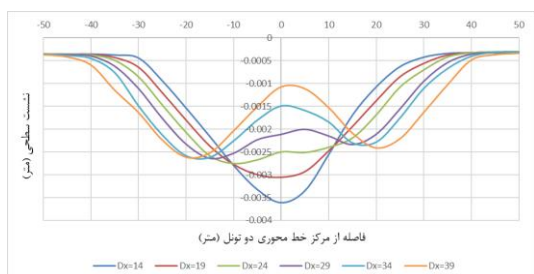
در این مقاله اندرکنش بین تونل‌های موازی و زمین اطراف با کمک مدل‌سازی دو بعدی به کمک نرم افزار اجزا محدود پلکسیس بررسی شده است. برای بررسی تمام حالت‌های مورد نظر ۳۶ مدل مختلف ساخته و اجرا شده است. طول مدل‌های ساخته شده به منظور کاهش تاثیر شرایط مرزی بر روی نتایج خروجی برابر با ۱۰۰ متر و ارتفاع آن نیز برابر با ۵۰ متر در حالت خط محوری افقی و ۷۰ متر برای حالت

گرفت.



شکل ۳- نشست سطحی (خط اتصال افقی - هم زمان)

شکل ۴، الگوی نشست سطحی را برای حالت خط اتصال افقی در صورتی که دو تونل غیر هم زمان حفاری شوند، نشان می‌دهد. در این حالت تونل اول (سمت چپ) ابتدا حفاری شده است و در ادامه، تونل دیگر حفاری شده است. طبق این شکل الگوی نشست سطحی بدست آمده نامتقارن است و نقطه بیشینه نشست به سمت تونل دوم متمایل شده است. بیشینه مقدار نشست سطحی برابر ۳/۶ میلی‌متر در کم‌ترین فاصله مرکز به مرکز دو تونل رخ داده است. در این حالت نیز با افزایش فاصله مرکز به مرکز از مقدار نشست کاسته شده و پس از متر ۲۴ محدوده تاثیر دو تونل در حال جدا شدن از یک دیگر می‌باشند.



شکل ۴- نشست سطحی (خط اتصال افقی - غیر هم زمان)

شکل ۵ و شکل ۶، الگوی توزیع لنگر خمشی روی پوشش تونل اول را در حالت حفاری هم زمان و غیر هم زمان نشان می‌دهند. طبق این شکل‌ها، روند حفاری و فاصله تاثیر زیادی روی توزیع لنگر خمشی ندارد و فقط تغییرات کمی روی دیواره شرقی (۹۰ درجه) تونل اول رخ داده است (کف تونل برابر با صفر درجه در نظر گرفته شده است). مقدار قدر مطلق بیشینه این تغییرات در حالت حفاری هم زمان با افزایش فاصله مرکز به مرکز دو تونل در حدود ۱۱/۶ درصد افزایش داشته است. همین تغییرات برای حالت

### جدول ۲- خصوصیات ژئوتکنیکی لایه بندی خاک منطقه

| پارامتر             | واحد     | لایه بندی ۱ | لایه بندی ۲ |
|---------------------|----------|-------------|-------------|
| وزن مخصوص اشباع     | $KN/m^3$ | ۲۰          | ۲۰/۵        |
| وزن مخصوص غیر اشباع | $KN/m^3$ | ۱۶/۵        | ۱۷          |
| ضخامت               | $m$      | ۱۴ - ۰      | ۱۴ <        |
| مدول الاستیسیته     | $KN/m^2$ | ۲۳۵۰۰       | ۵۰۰۰۰       |
| چسبندگی             | $KN/m^2$ | ۷/۵         | ۲۰          |
| زاویه اصطکاک داخلی  | درجه     | ۲۷          | ۲۷          |

### جدول ۳- خصوصیات پوشش نگهداری تونل‌ها

| پارامتر                      | مقدار |
|------------------------------|-------|
| مدول الاستیسیته ( $KN/m^2$ ) | ۲۷۰۰۰ |
| ضریب پواسون                  | ۰/۲   |
| وزن مخصوص ( $KN/m^3$ )       | ۲۶    |

### ۳- تحلیل نتایج

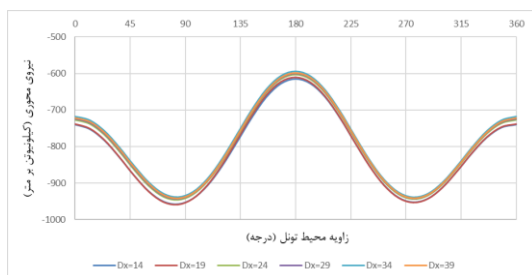
در این بخش نتایج به دست آمده از خروجی‌های ۳۶ مدل ساخته شده در سه حالت، وقتی که خط اتصال مرکز به مرکز دو تونل افقی، قائم یا مایل باشد مورد تحلیل قرار گرفته است.

#### ۳-۱- خط اتصال مرکز به مرکز افقی

در این حالت برای بررسی تاثیر افزایش فاصله بین دو تونل، شش مدل ساخته و اجرا شده است. فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها برابر ۱۴، ۱۹، ۲۴، ۲۹، ۳۴ و ۳۹ متر انتخاب شده است. در تمامی مدل‌های ساخته شده در این حالت، مرکز خط محوری ثابت در نظر گرفته شده است. شکل ۳، الگوی نشست سطحی بوجود آمده در اثر حفاری هم زمان هر دو تونل را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه نشست بوجود آمده برابر ۳/۳ میلی‌متر و در کم‌ترین فاصله مرکز به مرکز رخ داده است و با افزایش این فاصله از مقدار بیشینه نشست کاسته شده و فضای بین دو تونل پایدارتر می‌شود ولی محدوده متاثر از حفاری افزایش یافته است.

از فاصله ۲۴ متری (۴ برابر قطر تونل) محدوده تحت تاثیر حفاری در حال تبدیل شدن به دو قسمت مجزا و تبدیل شدن به الگوی  $W$  می‌باشد که نشان از کاهش تاثیر توامان حفاری‌ها دارد. لذا طبق شکل بدست آمده محدوده تاثیر هر یک از تونل‌ها را می‌توان ۴ برابر قطر تونل‌ها در نظر

است. مقدار این تغییرات برای دیواره شرقی تونل برابر ۱/۴ درصد کاهش است. همچنین این تغییرات برای حالت حفاری غیر هم زمان به ترتیب برابر ۲/۸ درصد کاهش و ۱/۵ درصد کاهش شده است.



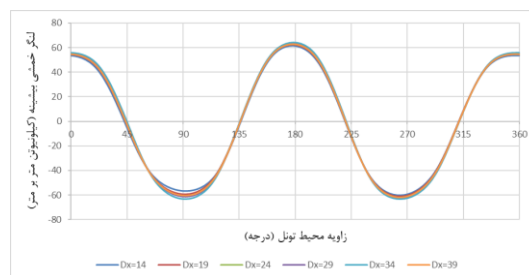
شکل ۸- نیروی محوری (خط اتصال افقی - غیر هم زمان)

### ۳-۲- خط اتصال مرکز به مرکز قائم

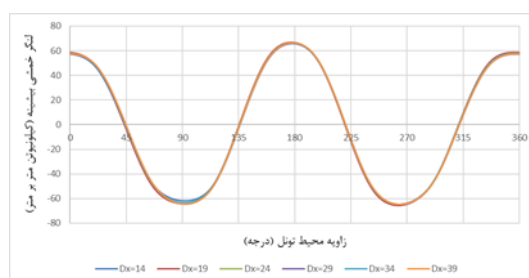
برای مطالعه تاثیر افزایش عمق تونل نسبت به تونل دیگر، در این بخش ۶ مدل ساخته و اجرا شده است. فاصله مرکز به مرکز تونل‌های مدل شده برابر با ۱۴، ۱۹، ۲۴، ۲۹، ۳۴ و ۳۹ متر می‌باشد. در تمامی مدل‌ها، موقعیت تونل کم عمق ثابت در نظر گرفته شده است و با افزایش فاصله مرکز به مرکز دو تونل، تونل دوم افزایش عمق پیدا می‌کند.

شکل ۹ و شکل ۱۰، الگوی نشست سطحی را در دو حالت حفاری هم زمان و غیر هم زمان نشان می‌دهند. طبق نتایج بدست آمده از شکل ۹، بیشینه تغییرات نشست سطحی با افزایش عمق تونل دوم کمتر از ۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. این در حالی است که به دلیل افزایش محدوده متاثر از حفاری تونل دوم در عمیق‌تر، مقدار نشست در فاصله ۲۰ متری از خط محوری دو تونل در حدود ۵۲ درصد بیش‌تر شده است. در حفاری غیر هم زمان ابتدا تونل کم عمق حفاری و سپس تونل دیگر حفاری شده است. مطابق شکل ۱۰، بیشینه تغییرات نشست سطحی در حدود ۱/۶ میلی‌متر شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که حفاری هم زمان دو تونل باعث بوجود آمدن نشست بیش‌تری شده است. در حالت غیر هم زمان، پس حفاری اول، مدل به تعادل رسیده سپس حفاری دوم شروع می‌شود که همین امر سبب کاهش تاثیر بر روی نشست سطحی می‌شود. در فاصله ۲۰ متری از خط محوری نیز در حدود ۳۹ درصد با افزایش عمق حفاری، افزایش نشست رخ داده است.

حفاری غیر هم زمان، ۴/۵ درصد افزایش در قدر مطلق بیشینه لنگر خمشی را نشان می‌دهد. طبق نتایج این دو شکل، حفاری هم زمان دو تونل تاثیر بیش‌تری بر روی پوشش نگهداری تونل‌ها دارد.

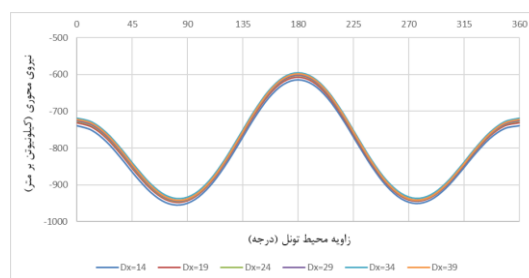


شکل ۵- لنگر خمشی (خط اتصال افقی - هم زمان)



شکل ۶- لنگر خمشی (خط اتصال افقی - غیر هم زمان)

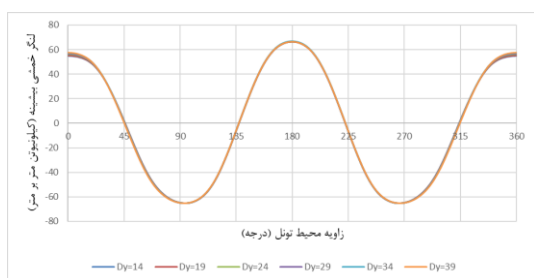
شکل ۷ و شکل ۸، الگوی توزیع نیروی محوری روی پوشش نگهداری تونل اول را نشان می‌دهند. طبق این شکل‌ها بیش‌ترین تاثیر حفاری بر روی نیمه شرقی تونل رخ داده است (صفر تا ۱۸۰ درجه). به طور کلی، عملیات حفاری باعث کاهش قدرمطلق نیروی محوری بر پوشش نگهداری تونل شده است.



شکل ۷- نیروی محوری (خط اتصال افقی - هم زمان)

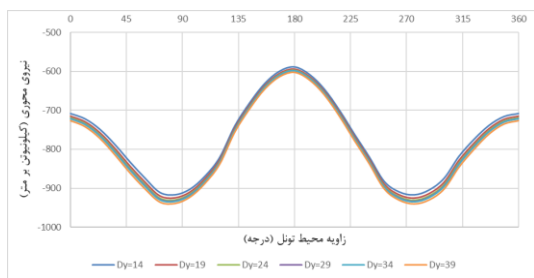
بیشینه مقدار این تغییرات برای حالت حفاری هم زمان برابر ۲/۷ درصد کاهش است که در تاج تونل رخ داده

مطابق شکل ۱۲، در حالت حفاری غیر هم زمان، مقدار تغییرات لنگر خمشی نسبت به حالت حفاری هم زمان کم‌تر است. در این حالت نیز نیمه پایینی تونل بیش از سایر بخش‌ها دست خوش تغییرات شده است. در بیش‌ترین حالت در کف تونل پس از رسیدن به فاصله مرکز به مرکز ۳۹ متری دو تونل، مقدار لنگر خمشی با افزایشی ۵ درصدی از حدود ۵۵ کیلو نیوتن متر بر متر به ۵۷/۷ کیلو نیوتن متر بر متر رسیده است.



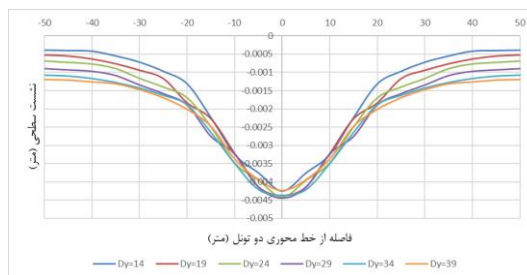
شکل ۱۲- لنگر خمشی (خط اتصال قائم - غیر هم زمان)

شکل ۱۳ و شکل ۱۴، الگوی توزیع نیروی محوری روی پوشش تونل کم عمق را در دو حالت حفاری هم زمان و غیر هم زمان نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۳، با افزایش عمق تونل دوم، قدر مطلق نیروی اعمال شده بر پوشش نگهداری تونل کم عمق افزایش یافته است.

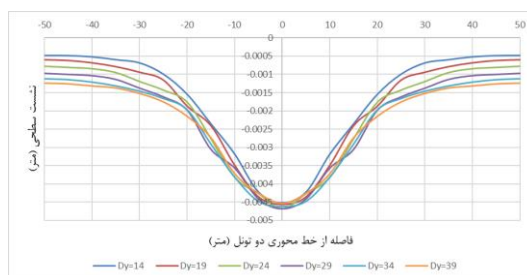


شکل ۱۳- نیروی محوری (خط اتصال قائم - هم زمان)

بیش‌ترین مقدار افزایش در دیواره‌های جانبی رخ داده است، به طوری که در مدل آخر با طول خط اتصال ۳۹ متر، قدر مطلق نیروی محوری نسبت به مدل اول با طول خط اتصال ۱۴ متر با افزایشی ۲/۶ درصد رو به رو شده است. طبق شکل ۱۴، نیز، بیش‌ترین تغییرات نیروی محوری بر روی دیواره‌ها رخ داده است، اما مقدار این تغییرات نسبت به حالت حفاری هم زمان کم‌تر است. بیشینه مقدار تغییرات

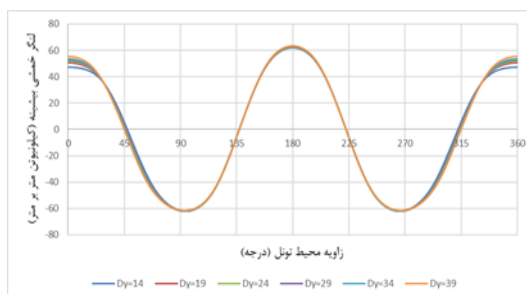


شکل ۹- نشست سطحی (خط اتصال قائم - هم زمان)



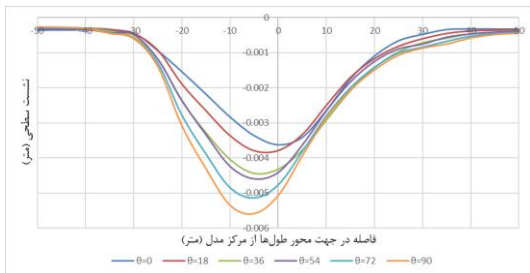
شکل ۱۰- نشست سطحی (خط اتصال قائم - غیر هم زمان)

شکل ۱۱ و شکل ۱۲، الگوی توزیع لنگر خمشی را بر روی پوشش نگهداری تونل کم عمق نشان می‌دهد. در هر دو حالت حفاری هم زمان و غیر هم زمان، افزایش عمق تونل دوم باعث افزایش لنگر خمشی وارد شده بر پوشش نگهداری تونل اول می‌شود. میزان این تغییرات در نیمه پایینی (صفر تا ۹۰ درجه و ۲۷۰ تا ۳۶۰ درجه) بیش‌تر است. طبق شکل ۱۱ در حالت حفاری هم زمان، وقتی فاصله مرکز به مرکز دو تونل برابر ۱۴ متر باشد، مقدار لنگر خمشی وارد شده به کف تونل اول برابر ۴۷ کیلو نیوتن متر بر متر است که پس از افزایش عمق تونل دوم در مدل‌های دیگر این مقدار به حدود ۵۵/۵ کیلو نیوتن متر بر متر می‌رسد. این تغییرات حدود ۱۸ درصد افزایش لنگر خمشی بر پوشش نگهداری را نشان می‌دهد.



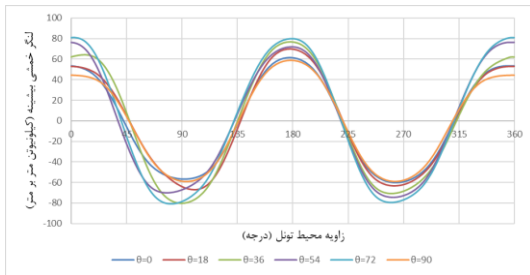
شکل ۱۱- لنگر خمشی (خط اتصال قائم - هم زمان)

در حالت حفاری غیر هم‌زمان، مدل پس از حفاری تونل اول به تعادل رسیده سپس تونل دوم حفاری شده است. به همین دلیل، مطابق آن چه در شکل ۱۶ دیده می‌شود، مقدار نشست بیشینه رخ داده در این حالت نسبت به حفاری هم‌زمان کم‌تر است. مقدار نشست سطحی با رسیدن زاویه خط محوری به ۹۰ درجه، ۵۴ درصد افزایش یافته است.

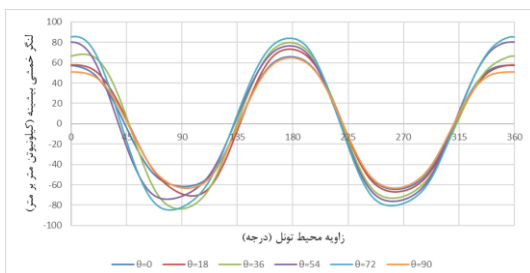


شکل ۱۶- نشست سطحی (خط اتصال مایل - غیر هم‌زمان)

شکل ۱۷ و شکل ۱۸، الگوی توزیع لنگر خمشی در هر دو حالت حفاری هم‌زمان و غیر هم‌زمان را نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۷، به دلیل نزدیک بودن فاصله بین دو تونل، توزیع لنگر خمشی روی پوشش نگهداری تونل اول با تغییرات زیادی همراه است. بیش‌ترین این تغییرات در محدوده صفر تا ۹۰ درجه محیط تونل رخ داده است.

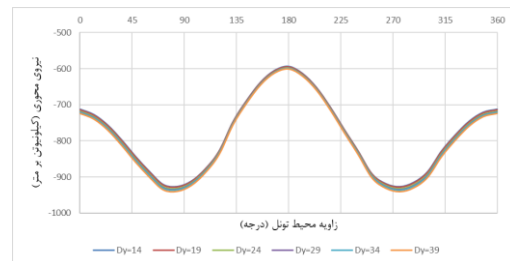


شکل ۱۷- لنگر خمشی (خط اتصال مایل - هم‌زمان)



شکل ۱۸- لنگر خمشی (خط اتصال مایل - غیر هم‌زمان)

قدر مطلق نیروی محوری مطابق شکل ۱۴، با افزایش فاصله مرکز به مرکز دو تونل به ۳۹ متر، حدود ۱/۵ درصد افزایش را نشان داده است.

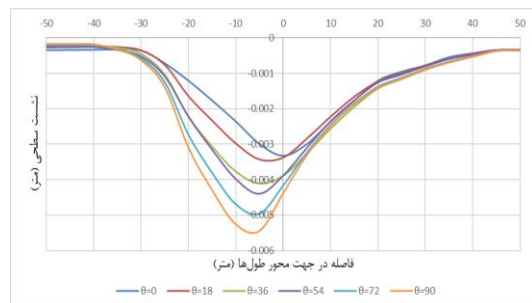


شکل ۱۴- نیروی محوری (خط اتصال قائم - غیر هم‌زمان)

### ۳-۳- خط اتصال مرکز به مرکز مایل

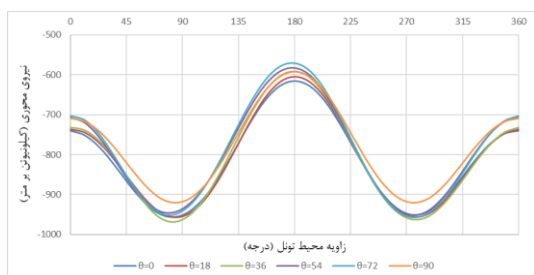
برای مطالعه این بخش فاصله مرکز به مرکز دو تونل ثابت و برابر ۱۴ متر در نظر گرفته شده است و فقط زاویه خط اتصال مرکز تونل‌ها با محور افقی افزایش می‌یابد. تحلیل‌ها روی شش مدل با زوایای محوری ۰، ۱۸، ۳۶، ۵۴، ۷۲ و ۹۰ درجه انجام شده است. در این مدل‌ها، تونل سمت چپ به عنوان تونل مرجع لحاظ شده است و بررسی‌ها روی آن انجام شده است.

شکل ۱۵ و شکل ۱۶، الگوی نشست سطحی بوجود آمده را در دو حالت حفاری هم‌زمان و غیر هم‌زمان نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۵، با افزایش زاویه خط اتصال دو تونل با محور افقی، مقدار نشست سطحی افزایش پیدا کرده و به سمت تونل مرجع متمایل شده است (مرکز تونل مرجع در موقعیت ۷- محور طول‌ها قرار دارد). مقدار نشست سطحی با رسیدن زاویه خط اتصال مرکز دو تونل از صفر به ۹۰ درجه، از ۳/۳ میلی‌متر به ۵/۴ میلی‌متر رسیده است که ۶۳ درصد افزایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- نشست سطحی (خط اتصال مایل - هم‌زمان)

عملیات حفاری تونل دوم باعث بوجود آمدن نیروی محوری القایی بیش‌تری روی پوشش نگهداری تونل مرجع شده است.



شکل ۲۰- نیروی محوری (خط اتصال مایل - غیر هم زمان)

#### ۴- اندرکنش لنگر خمشی - نیروی محوری

به منظور بررسی رفتار سازه‌ای تونل در فرایند حفاری تونل‌ها منحنی‌های اندرکنش لنگر خمشی - نیروی محوری برای موارد بررسی شده آورده شده است. هدف از بررسی اندرکنش بین لنگر خمشی و نیروی محوری تعیین وضعیت پایداری سازه تونل می‌باشد. نمودارهای اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری برای حالت‌های بحرانی حفاری تونل‌ها در هر سه وضعیت خط اتصال مرکز به مرکز افقی، قائم و مایل آورده شده است. اگر سازه تونل در بحرانی‌ترین حالت هر وضعیت پایدار باشد می‌توان نتیجه گرفت که در سایر حالت‌ها نیز پایدار است. حالت بحرانی برای وضعیت خط اتصال مرکز به مرکز افقی و قائم وقتی است که فاصله مرکز این دو تونل ۱۴ متر باشد. برای حالت مایل نیز طبق نتایج به دست آمده از شکل ۱۷ و شکل ۱۸، زاویه ۷۲ تا ۹۰ درجه وضعیت بحرانی برای لنگر خمشی این نوع حفاری را نشان داده است. همچنین مقدار نیروی محوری بحرانی برای حالت خط اتصال مرکز به مرکز طبق شکل ۱۹ و شکل ۲۰، برای زاویه ۳۶ درجه رخ داده است.

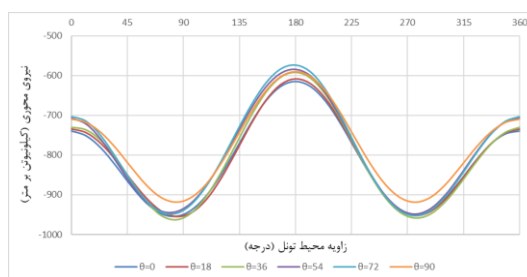
از آن جایی که زاویه ۹۰ درجه با حالت حفاری قائم یکسان است فقط منحنی اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری برای زاویه خط اتصال مرکز به مرکز ۷۲ و ۳۶ درجه آورده شده است.

منحنی اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری مرتبط با خواص سازه‌ای سازه تونل می‌باشد. به همین علت ارتباط مستقیم با نوع ساخت پوشش تونل دارد و برای رسم آن باید

همچنین بیش‌ترین مقدار لنگر خمشی رخ داده در محیط تونل مربوط به زاویه خط اتصال مرکز به مرکز تونل‌ها با محور افقی ۷۲ درجه می‌باشد. مقدار بیشینه لنگر خمشی در کف تونل با افزایش زاویه خط اتصال مرکز دو تونل از ۴۴/۵ به ۸۱ کیلونیوتن متر بر متر رسیده است که حدود ۸۱ درصد رشد را نشان می‌دهد. همچنین مقدار قدر مطلق این تغییرات برای دیواره جانبی (۹۰ درجه) تونل با ۲۹ درصد افزایش از ۵۷ به ۸۰ کیلونیوتن متر بر متر رسیده است.

مطابق شکل ۱۸، تغییرات بوجود آمده در اثر حفاری تونل دوم روی تونل اول نسبت به حالت حفاری هم زمان کم‌تر است. در کف تونل پس از افزایش زاویه خط اتصال مرکز دو تونل با محور افقی و رسیدن آن از صفر به ۷۲ درجه، بیش‌ترین تغییرات رخ داده است، به طوری که مقدار لنگر خمشی از ۵۱ به ۸۵ کیلونیوتن متر بر متر رسیده است که معادل ۶۶ درصد افزایش است. همچنین مقدار قدر مطلق لنگر خمشی در دیواره جانبی (۹۰ درجه) با افزایش ۲۶ درصدی رو به رو شده است و از ۶۲ به ۸۳ کیلونیوتن متر بر متر رسیده است.

شکل ۱۹ و شکل ۲۰، الگوی توزیع نیروی محوری بر روی پوشش نگهداری تونل اول را نشان می‌دهد. طبق این دو شکل، محل قرارگیری تونل‌ها بر توزیع نیروی محوری تاثیر بیش‌تری نسبت به تاثیر روند حفاری آن‌ها دارد.

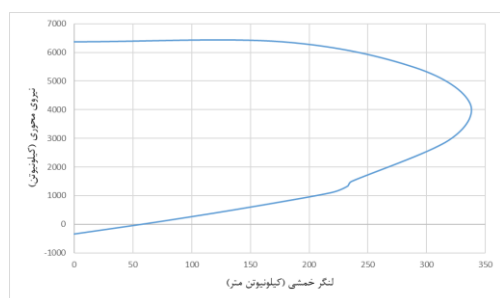


شکل ۱۹- نیروی محوری (خط اتصال مایل - هم زمان)

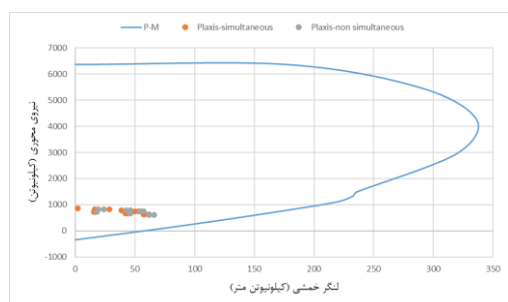
نقاط روی محیط تونل بین زاویه صفر تا ۹۰ درجه، بیش‌ترین تاثیر را از حفاری تونل دوم گرفته‌اند و توزیع غیر یکنواختی از نیروی محوری دارند. بیشینه تغییرات رخ داده برای حفاری هم زمان، معادل ۴/۶ درصد افزایش است در حالی که برای حفاری غیر هم زمان همین مقدار معادل ۴/۹ درصد افزایش می‌باشد. در حالت حفاری غیر هم زمان،



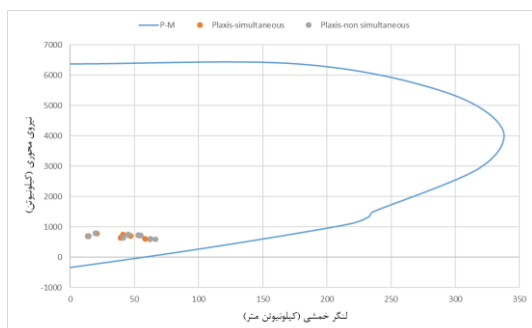
شده است. هرگاه مقادیر مرتبط با لنگر خمشی و نیروی محوری وارد بر محیط تونل درون پوش مجاز قرار گیرد می‌توان اظهار داشت که پوشش تعریف شده برای آن تونل در مقابل بارهای وارد شده ناشی از عملیات حفاری پایدار است. اگر هرکدام از نقاط خارج از این محدوده قرار گیرند، در آن بخش از محیط تونل شاهد ناپایداری‌هایی خواهیم بود که می‌توان با طراحی مجدد پوشش تونل نسبت به رفع و مقاوم‌سازی آن اقدام کرد.



شکل ۲۲- پوش مجاز لنگر خمشی و نیروی محوری پوشش طراحی شده برای تونل



شکل ۲۳- نمودار اندرکنش لنگر خمشی - نیروی محوری حالت خط اتصال مرکز به مرکز افقی



شکل ۲۴- نمودار اندرکنش لنگر خمشی - نیروی محوری حالت خط اتصال مرکز به مرکز قائم

از نرم افزارهای تحلیل سازه‌ای استفاده کرد. برای تعیین پوش مجاز پوشش نگهداری تونل از نرم افزار *SAP 2000* استفاده شده است. پوشش پیش فرض انتخابی دارای ضخامت ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد که با آرما تورهای فولادی با قطر پیش فرض نرم افزار ۱۲d مسلح شده است. در هر ۱/۵ متر از این پوشش ۱۲ عدد آرما تور قرار گرفته است که در راستای ضخامت در وسط پوشش قرار دارند. جدول ۴، خواص پوشش مورد نظر را نشان می‌دهد. شکل ۲۱، یک مقطع به طول یک متر از این پوشش را در محیط نرم افزار *SAP 2000* نشان می‌دهد.

جدول ۴- خواص پوشش مورد نظر

| پارامتر                  | واحد                    | مقدار  |
|--------------------------|-------------------------|--------|
| مدول الاستیسیته بتن      | <i>GPa</i>              | ۳۵     |
| ضریب پواسون بتن          | -                       | ۰/۲    |
| وزن مخصوص بتن            | <i>KN/m<sup>3</sup></i> | ۲۶     |
| مقاومت فشاری بتن         | <i>MPa</i>              | ۴۰     |
| مدول الاستیسیته آرما تور | <i>GPa</i>              | ۲۰۰    |
| ضریب پواسون آرما تور     | -                       | ۰/۳    |
| وزن مخصوص آرما تور       | <i>KN/m<sup>3</sup></i> | ۷۶/۴۹۵ |

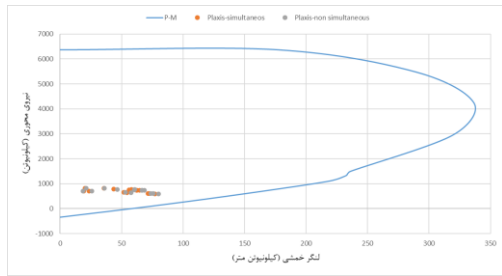


شکل ۲۱- مقطع یک متری از پوشش مدل شده

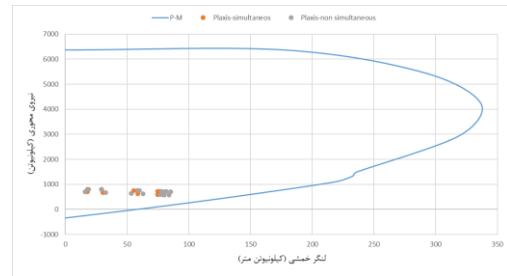
شکل ۲۲، منحنی پوش مجاز برای پوشش در نظر گرفته شده به عنوان پوشش نهایی تونل‌های مدل شده را نشان می‌دهد.

شکل ۲۳، شکل ۲۴، شکل ۲۵ و شکل ۲۶، وضعیت رفتار سازه‌ای پوشش تونل مرجع را در فرایند حفاری به ترتیب در حالت‌های خط اتصال مرکز به مرکز افقی، قائم و مایل نشان می‌دهند. روند حفاری هم زمان و غیر هم زمان نیز در این شکل‌ها برای حالت‌های مورد نظر آورده شده است.

برای شکل‌های ۲۳ تا ۲۶، کلیه نقاط محیط تونل با مقادیر مربوط به لنگر خمشی و نیروی محوری آن‌ها آورده



شکل ۲۶- نمودار اندرکنش لنگر خمشی - نیروی محوری  
حالت خط اتصال مرکز به مرکز مایل (۳۶ درجه)



شکل ۲۵- نمودار اندرکنش لنگر خمشی - نیروی محوری  
حالت خط اتصال مرکز به مرکز مایل (۷۲ درجه)

### ۵- نتیجه‌گیری

جدول ۵، جدول ۶ و جدول ۷، نتایج کلی به دست آمده از مدل‌سازی‌ها را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل‌های ۲۳ تا ۲۶ مشخص است، تمامی حالت‌های اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری ایجاد شده ناشی از فرایند حفاری در داخل محدوده پوش مجاز پوشش نگهداری قرار گرفته‌اند. با توجه به این موضوع پوشش نگهداری فرضی طراحی شده پایدار خواهد بود.

### جدول ۵- نتایج کلی خط اتصال افقی

|   |           |
|---|-----------|
| با افزایش فاصله مقدار نشست سطحی کاهش یافته است.                                     | نشست سطحی |
| مقدار بیشینه نشست در حالت حفاری هم زمان کم‌تر از حالت حفاری غیر هم زمان است.        |           |
| با افزایش فاصله مقدار لنگر خمشی روی دیواره شرقی تونل اول افزایش یافته است.          | لنگر خمشی |
| مقدار بیشینه لنگر خمشی در حالت حفاری هم زمان بیش‌تر از حالت حفاری غیر هم زمان است.  |           |
| با افزایش فاصله مقدار قدرمطلق نیروی محوری روی پوشش نگهداری تونل اول کاهش یافته است. | بار محوری |
| روند حفاری تغییرات تقریباً یکسانی را روی توزیع بار محوری ایجاد کرده است.            |           |

### جدول ۶- نتایج کلی خط اتصال قائم

|  |           |
|--|-----------|
| با افزایش فاصله مقدار نشست سطحی افزایش یافته است.                                      | نشست سطحی |
| محدوده متأثر از حفاری تونل دوم با افزایش فاصله به مقدار بیش‌تری گسترده شده است.        |           |
| حفاری هم زمان باعث به وجود آمدن نشست سطحی بیش‌تری شده است.                             |           |
| با افزایش فاصله مقدار لنگر خمشی روی پوشش نگهداری تونل اول افزایش یافته است.            | لنگر خمشی |
| تغییرات لنگر خمشی در حالت حفاری غیر هم زمان کم‌تر است.                                 |           |
| با افزایش فاصله مقدار قدر مطلق نیروی محوری روی پوشش نگهداری تونل اول افزایش یافته است. | بار محوری |
| تغییرات نیروی محوری در حالت حفاری غیر هم زمان کم‌تر است.                               |           |

جدول ۷- نتایج کلی خط اتصال مایل

|  |           |
|--|-----------|
| با افزایش زاویه بین خط اتصال مرکز دو تونل با محور افقی نشست سطحی افزایش یافته است.   | نشست سطحی |
| در حالت حفاری غیر هم زمان مقدار بیشینه نشست سطحی کم‌تر است.  |           |
| با افزایش زاویه بین خط اتصال مرکز دو تونل با محور افقی مقدار لنگر خمشی روی پوشش نگهداری تونل اول افزایش یافته است.                   | لنگر خمشی |
| تغییرات لنگر خمشی در حالت حفاری غیر هم زمان کم‌تر است.   |           |
| با افزایش زاویه بین خط اتصال مرکز دو تونل با محور افقی توزیع غیر یکنواختی از نیروی محوری روی پوشش نگهداری تونل اول به وجود آمده است. | بار محوری |
| تغییرات نیروی محوری در حالت حفاری غیر هم زمان بیش‌تر است.  |           |

- مطالعات انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که محل قرارگیری دو تونل نسبت به یک دیگر و همچنین روند حفاری آن‌ها (هم زمان بودن یا غیر هم زمان بودن) بر روی نشست سطحی و نیروهای داخلی تونل‌ها تا چه میزان تاثیر گذار است. نتایج کلی که از تحلیل‌های انجام شده بدست آمده را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:
- نشست سطحی بیشینه در حالتی که خط اتصال مرکز به مرکز دو تونل افقی باشد، وقتی حفاری هم زمان انجام می‌شود برابر  $3/3$  میلی‌متر شده است در حالی که این مقدار برای حفاری غیر هم زمان کم‌تر است. اگر خط اتصال مرکز دو تونل قائم باشد، با افزایش عمق تونل دوم مقدار بیشینه نشست سطحی نیز افزایش یافته است. مقدار گسترش محدوده متاثر از حفاری با افزایش عمق تونل دوم نیز، افزایش یافته است. بیشینه مقدار نشست سطحی در حالت حفاری هم زمان وقتی طول خط اتصال مرکز دو تونل از  $14$  به  $39$  متر می‌رسد،  $2$  میلی‌متر افزایش یافته است. این مقدار تغییرات در حالت حفاری غیر هم زمان به دلیل به تعادل رسیدن منطقه پس از حفاری تونل اول، کم‌تر است. اگر خط اتصال مرکز به مرکز تونل‌ها مایل باشد، با افزایش زاویه بین خط اتصال مرکز دو تونل و محور افقی، مقدار نشست سطحی افزایش می‌یابد. در حالت حفاری هم زمان وقتی این زاویه از صفر به  $90$  درجه می‌رسد مقدار نشست سطحی  $63$  درصد افزایش یافته است در حالی که در حفاری غیر هم زمان این مقدار معادل  $54$  درصد افزایش است.
  - طبق نتایج مدل‌سازی عددی، محدوده تاثیر تونل‌ها  $4$
- برابر قطر هر یک از آن‌ها بدست آمده است. در حالتی که خط اتصال مرکز دو تونل افقی باشد، افزایش طول این خط منجر به ایجاد تغییرات کمی در توزیع لنگر خمشی بر روی پوشش تونل اول شده است. بیشینه مقدار این تغییرات برای حفاری هم زمان و غیر هم زمان با افزایش طول خط اتصال بین دو مرکز تونل نسبت به طول  $14$  متر، به ترتیب  $11/6$  درصد و  $4/5$  درصد افزایش را نشان داده است. وقتی خط اتصال مرکز به مرکز دو تونل قائم است، با افزایش عمق تونل دوم مقدار لنگر خمشی وارد بر پوشش نگهداری تونل اول (کم عمق) افزایش می‌یابد. بیشینه این تغییرات با افزایش عمق نسبت به طول خط اتصال  $14$  متر،  $18$  درصد افزایش برای حفاری هم زمان و  $5$  درصد افزایش برای حفاری غیر هم زمان شده است. اگر این خط اتصال مایل باشد، با افزایش زاویه بین این خط و محور افقی، توزیع لنگر خمشی با تغییرات زیادی همراه است که بیش‌ترین این تغییرات در محدوده زاویه صفر تا  $90$  درجه محیط تونل رخ داده است. بیش‌ترین مقدار لنگر خمشی در زاویه  $72$  درجه خط اتصال مرکز دو تونل با محور افقی به وقوع پیوسته است که معادل  $81$  درصد رشد نسبت به زاویه صفر درجه در حالت حفاری هم زمان و  $66$  درصد رشد در حالت حفاری غیر هم زمان است.
- با افزایش طول خط اتصال دو مرکز تونل، قدر مطلق نیروی محوری وارد بر پوشش تونل اول کاهش یافته است. مقدار بیشینه این تغییرات وقتی طول خط به  $39$  متر می‌رسد نسبت به طول  $14$  متر،  $2/7$  و  $2/8$

تونل رخ داده است. حفاری غیر هم زمان باعث اعمال نیروی محوری القایی بیش تری روی پوشش تونل شده است.

- با توجه به نتایج به دست آمده زاویه ۷۲ تا ۹۰ درجه برای خط اتصال مرکز به مرکز دو تونل، به منظور محل قرارگیری تونل‌ها کنار یک دیگر جز محدوده بحرانی در نظر گرفته می‌شود.

- با توجه به منحنی پوش مجاز پوشش نگهداری و مقادیر به دست آمده برای لنگر خمشی و نیروی محوری، سازه تونل در مقابل این بارها و اندرکنش بین لنگر و نیرو مقاوم است و رفتار مناسبی ارائه داده است.

درصد کاهش را برای حفاری هم زمان و غیر هم زمان نشان می‌دهد. در حالی که با افزایش طول این خط در حالت قائم، مقدار قدر مطلق نیروی محوری وارد بر پوشش تونل اول افزوده شده است. مقدار این افزایش در حالت حفاری هم زمان وقتی طول خط اتصال مرکز به مرکز دو تونل ۳۹ متر است نسبت به طول ۱۴ متر، ۲/۶ درصد است که نسبت به حفاری غیر هم زمان ۱/۱ درصد بیش تر است. وقتی این خط اتصال مایل باشد، افزایش زاویه بین این خط و محور افقی باعث توزیع غیر یکنواختی از نیروی محوری روی پوشش نگهداری تونل اول شده است. بیشینه این تغییرات در محدوده صفر تا ۹۰ درجه از محیط

## ۶- مراجع

- Afshani, A., Akagi, H., & Konishi, S. (2020). *Close construction effect and lining behavior during tunnel excavation with an elliptical cross-section. Soils and Foundations, 60(1), 28-44.*
- Ajorloo, H., & Ashtiani, M. (2016). *Urban tunneling methods and related challenges. Tehran studies and planning center. Tehran.*
- Asnavandi, M., Hasanloo, M., Hosseini, V., & Mansourvar, M. (2012). *Studying the effect of excavating urban tunnels at the intersection of metro lines on adjacent structures using numerical methods. First National Conference on Civil Engineering and Development. Iran.*
- 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.*
- Chegade, F. H., & Shahrour, I. (2008). *Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure. Tunnelling and underground space technology, 23(2), 210-214.*
- Faez, N. (2014). *Numerical analysis of the interaction of parallel tunnels. MSc thesis. Zanjan university.*
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control. CRC Press.*
- Hosseinzadeh, M. (2014). *Studying the effect of different soil parameters on the design of tunnels. MSc thesis. Khajeh nasir toosi university.*
- Hosseini, S., & Shahriar, K. (2012). *Three-dimensional modeling of large and intersecting tunnels. Ninth national tunnel conference. Iran.*

- Kawata, T., Ohtsuka, M., & Kobayashi, M. (1993). *Observational construction of large-scaled twin road tunnels with minimum interval*. In *Infrastructures souterraines de transports* (pp. 241-248).
- Lai, H., Zheng, H., Chen, R., Kang, Z., & Liu, Y. (2020). *Settlement behaviors of existing tunnel caused by obliquely under-crossing shield tunneling in close proximity with small intersection angle*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103258.
- Lin, X. T., Chen, R. P., Wu, H. N., & Cheng, H. Z. (2019). *Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 89, 78-90.
- Liu, H. Y., Small, J. C., & Carter, J. P. (2008). *Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), 399-420.
- 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(5), 880-894.
- Liu, X., Fang, Q., Zhang, D., & Wang, Z. (2019). *Behaviour of existing tunnel due to new tunnel construction below*. *Computers and Geotechnics*, 110, 71-81.
- Maadikhah, A., & Zare, Sh. (2012). *Analyzing the effect of excavation of Tehran Metro Line 7 tunnel on the supporting system of Line 1 station in a non-level intersection using numerical modeling. The first asian conference and the ninth national tunnel conference*. Iran.
- Saitoh, A., Gomi, K., & Shiraishi, T. (1995). *Influence forecast and field measurement of a tunnel excavation crossing right above existing tunnels*. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 3, No. 32, p. 142A).
- Shalabi, F. I., Cording, E. J., & Paul, S. L. (2016). *Sealant behavior of gasketed segmental tunnel lining—Conceptual model*. *Geomechanics and Tunnelling*, 9(4), 345-355.
- Shalabi, F. I. (2004, March). *Assessment of tunnel design based on different empirical approaches: case study in Jordan*. In *International conference on structural and geotechnical engineering and construction technology, Mansoura, Egypt* (pp. 23-25).
- Shahrouh, I., & Mroueh, H. (1997). *Three-dimensional non linear analysis of a closely twin tunnels*. In *Sixth international symposium on numerical models in geomechanics (NUMOG VI)* (Vol. 2, pp. 481-487).
- Shalabi, F. I., Cording, E. J., & Paul, S. L. (2012). *Concrete segment tunnel lining sealant performance under earthquake loading*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 31, 51-60.
- Shalabi, F. I. (2005). *FE analysis of time-dependent behavior of tunneling in squeezing ground using two different creep models*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(3), 271-279.
- Shalabi, F. I., Al-Qablan, H. A., & Al-Hattamleh, O. H. (2009). *Elasto-plastic behavior of Raghadan tunnel based on RMR and Hoek–Brown classifications*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(2), 237-248.
- Shalabi, F. I., & Cording, E. J. (2005, June). *3D-finite element analysis of segmental concrete tunnel lining deformation and moments under the effect of static and earthquake loading*.

*In Proceeding of the 11th international conference on computer methods and advances in geomechanics, Torino, Italy (pp. 19-24).*

Shalabi, F. I. (2017). *Interaction of twin circular shallow tunnels in soils—parametric study. Open Journal of Civil Engineering, 7(1), 100-115.*

Wang, H. N., Gao, X., Wu, L., & Jiang, M. J. (2020). *Analytical study on interaction between existing and new tunnels parallel excavated in semi-infinite viscoelastic ground. Computers and Geotechnics, 120, 103385.*

Yamaguchi, I., Yamazaki, I., & Kiritani, Y. (1998). *Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 13(3), 289-304.*

Zhang, C., Zhang, X., & Fang, Q. (2018). *Behaviors of existing twin subway tunnels due to new subway station excavation below in close vicinity. Tunnelling and Underground Space Technology, 81, 121-128.*

## *Parametric analysis of the interaction between parallel tunnels and the surrounding ground based on their relative position and excavation process – A case study: tunnels built in the urban environment of Shiraz*

**K. Shahriar<sup>1\*</sup>; M. Arash<sup>2</sup>; M. R. Faraji Tilehnoei<sup>3</sup>**

1- Professor; Faculty of Mining Eng., Amirkabir University of Technology, k.shahriar@aut.ac.ir

2- MSc student; Faculty of Mining Eng., Amirkabir University of Technology, m75.arash@aut.ac.ir

3- MSc student; Faculty of Mining Eng., Amirkabir University of Technology, mrfaraji75@aut.ac.ir

Received: 30 Nov 2021; Accepted: 6 Apr 2022

DOI: 10.22044/TUSE.2022.11441.1440

---

### **Keywords**

**Tunneling**  
**Surface subsidence**  
**Parametric analysis**  
**Interaction**  
**Plaxis 2D**  
**Bending moment**  
**Axial force**

---

### **Extended Abstract**

#### **Summary**

Tunnels are built as a result of the growth of the transportation industry. In some cases, tunnels are built crosswise or parallel to each other in different levels. The distribution of stress around the tunnels and the behavior of the ground are affected by the location of the tunnels relative to each other and the drilling process. Accidents can occur due to a lack of understanding of the behavior of adjacent structures. As a result, understanding the behavior of structures is critical. The goal of is to fully investigate the impact of parallel tunnels drilling on the inductive forces of the first tunnel maintenance cover and subsidence in order to better understand the behavior of nearby structures. These analyses in this research have been carried out using two-dimensional (2D) finite element method with the help of Plaxis 2D software. According to the findings, the amount of surface subsidence decreases as the horizontal distance between the two tunnels increases, while the amount of surface subsidence increases as the vertical distance between the tunnels increases. Increasing the depth of the second tunnel has also increased the inductive load and bending moment on the first tunnel maintenance cover. Increasing the vertical distance between the two tunnels on the desired outlets causes more changes than increasing the horizontal distance.

### **Introduction**

The tendency to build structures in the underground space has increased due to lack of surface space. As a result, some structures must be built next to each other. The proximity of structures creates an interaction in the structures and the ground surrounding these structures that has to be analyzed.

### **Methodology and Approaches**

In this paper, the excavation effect of two adjacent tunnels has been analyzed in order to determine the effective parameters. All studies in this paper have been performed with the help of Plaxis 2D finite element software.

### **Results and Conclusions**

The most important results of this research are as follows:

The impact zone of the two adjacent tunnels is in the limit that is extended four times greater than the diameter of the tunnels. The maximum bending moment changes for simultaneous and non-simultaneous excavation modes are 18% and 5%, respectively. Furthermore, for the axial force, there is an increase of 2.6 and 1.5 percent for simultaneous and non-simultaneous excavation modes, respectively. The maximum surface subsidence is -3.3 mm in the horizontal axis line mode. The angle of 72 to 90 degrees can be considered as the critical angle.

---