

انتخاب روش حفاری بهینه تونل تک در خاک (مطالعه موردی: خط ۳ قطار شهری اصفهان)

مقاله علمی - پژوهشی

امید خسروی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

میثم بیات^{*}، استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: bayat.m@pci.iaun.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵

صفحه ۹۲-۷۹

چکیده

امروزه با پیشرفت فناوری، سهولت نسبی در حفاری و ساخت و سازهای زیرزمینی، توجه بسیاری از کشورها به احداث فضای زیر زمینی معطوف شده است. نیاز به سیستم حمل و نقل زیرزمینی در اکثر شهرهای بزرگ جهان به ویژه برای جاهایی که با مشکل ترافیک مواجه هستند، کاملاً محسوس است. این سیستم نیازمند یک سازه تونل است که در مناطق شهری عمدتاً در زمین‌های سست و در بخش‌های سطحی احداث می‌شود و تاثیر آن می‌تواند تا سطح زمین گسترش یابد. انتخاب بهترین روش برای حفاری این تونل‌ها تابعی از خصوصیات خاک، مقطع و موقعیت تونل است که باید به بررسی آنها با توجه به منطقه حفاری پرداخته شود. در این تحقیق موارد ذکر شده برای خط ۳ متروی اصفهان در منطقه ایستگاه کشاورزی که قرار است به روش NATM حفاری گردد جهت یافتن بهینه‌ترین حالت حفاری بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که انتخاب الگوی روش حفاری می‌تواند اثرات مهمی بر روی نشست، تغییر شکل مقطع تونل و جابجایی افقی در سطح زمین داشته باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، تاثیر شرایط بارگذاری، هندسه استقرار، الگوی حفاری، آرایش متفاوت سازه‌های سطحی، مقدار سربار، ابعاد صفحه اعمال سربار بر روی رفتار تونل بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: تونل، نشست سطحی، الگوی حفاری، NATM، PLAXIS

۱- مقدمه

احداث این قبیل سازه‌ها، اجرای نامناسب آنها بعضاً افراد را با مشکلات متعددی مواجه کرده است (Gupta et al. 2008). به عنوان مثال عدم توجه به ناهمسانی و تراکم پذیری زیاد مصالح آبرفتی و همچنین برهم خوردگی شدید میدان تنش در لایه‌های زیرسطحی، در ساخت تونل‌های کم عمق می‌تواند باعث ایجاد نشست زیاد، خسارت به ساختمان‌ها و تاسیسات مجاور و حتی ناپایداری کامل جبهه حفاری شود (Jones et al. 2010; Li et al. 2016). بنابراین، آگاهی از عوامل

امروزه در بسیاری از مناطق شهری، مخصوصاً در نواحی با تراکم جمعیتی زیاد، کمبود فضاهای سطحی و همچنین نیاز به رفت و آمد سریع و آسان، باعث افزایش تقاضا برای ساخت تونل‌های کم عمق به منظور توسعه شبکه حمل و نقل به ویژه خطوط مترو شده است (Broere 2016). از طرفی محل استقرار این تونل‌ها به طور معمول در عمق کمتر از ۲۰ متر و در خاک‌های نرم سطحی است (Wang et al. 2018). این شرایط سبب شده است که با وجود فواید و یا ضرورت برای

تنش‌های اولیه، تاثیر ضریب فشار جانبی خاک در حالات مختلف (K_0) و روش‌های تونل زنی را بررسی کرده و بیشتر به بررسی تاثیر حفاری تونل بر آسیب‌های وارده بر ساختمان تاکید کرده‌اند و کمتر به تاثیر وجود ساختمان و بار آن بر روی نشست سطحی و همچنین تاثیرات آن بر نشست و جابجایی‌های تاج تونل پرداخته شده است (Anagnostou; Burd, H. J., Houlsby, G. T., Augarde, C. E., & Liu; Desari, G. R., Rawlings, C. G., & Bolton; Katzenbach, R., & Breth; Lee, G. T. K., & Ng; Tang, D. K. W., Lee, K. M., & Ng; Vermeer, P. A., Bonnier, P. G., & Maoller; Dimmock and Mair 2008; Mathew and Lehane 2013). هدف اصلی این پژوهش، تحلیل عددی تاثیر شرایط بارگذاری، هندسه استقرار والگوی حفاری بر رفتار تونل تک در خاک با چسبندگی بالا است و همچنین تاثیر آرایش متفاوت سازه‌های سطحی و اثر ترکیب توام آن با سایر متغیرها نظیر مقدار سربار، ابعاد صفحه اعمال سربار و هندسه استقرار بررسی شده است و سپس با توجه به ترکیب موارد مورد مطالعه، نتایج و مقادیر نشست‌ها، نیروهای اعمالی و جابجایی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

تاثیرگذار در ایجاد این مخاطرات نه تنها برای طراحی اولیه صحیح و اجرای موفق پروژه، بلکه برای تصمیم‌گیری در مورد اقدامات اصلاحی برای سازه‌های آسیب دیده ناشی از احداث تونل نیز لازم است (Liu et al. 2008). در حال حاضر استفاده از روش‌های عددی به دلیل سرعت و دقت کافی آنها برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پاسخ زمین به حفاری تونل‌های زیر سطحی و پارامترهای موثر بر آن بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Möller and Vermeer 2008; Li et al. 2015). علی‌رغم گستردگی مطالعه‌های انجام شده در زمینه تونل تک، رفتارهای تونل‌ها با شرایط متفاوت بارگذاری و الگوی مختلف حفاری در شرایط مختلف بارگذاری کمتر مورد بررسی قرار گرفته است (de Farias et al. 2004; Karakus et al. 2007; Yoo and Kim 2008; Ocak 2008; Chen et al. 2009; Jones et al. 2010; Svoboda et al. 2010; Chakeri et al. 2011; Sun et al. 2012).

در چندین دهه گذشته محققین زیادی مطالعاتی درباره نشست ناشی از تونل‌سازی و عوامل موثر بر آن در محیط‌های شهری انجام داده‌اند. اکثر این محققین عواملی همچون نوع خاک، خصوصیات زمین‌شناسی، شرایط اولیه و

۲-پیشینه تحقیق

بر اساس مطالعات انجام شده، تقریباً در حدود ۵۰۰ کیلومتر خط مترو برای هفت کلان شهر ایران به منظور فائق آمدن بر مشکلات حمل و نقل شهری پیش بینی شده‌است. در این میان برای شهر اصفهان، به عنوان یک شهر تاریخی و مهم واقع در مرکز ایران، سه سه خط مترو با طول ۵۸ کیلومتر پیش‌بینی و در نظر گرفته شده‌است. براساس مطالعات انجام شده، محدوده خط ۳ متروی اصفهان دارای طول حدود ۱۰ کیلومتر می‌باشد.

۲-۱- مشخصات ژئوتکنیکی مسیر تونل

نهشته‌های کواترنر عمده‌ترین رسوبات منطقه مورد مطالعه می‌باشند به طوری که بیش از ۹۵ درصد بستر مسیر مورد مطالعه را این نهشته‌ها در بر گرفته‌اند. رسوبات مذکور شامل رس‌های سیلتی و شنی و ماسه گوشه‌دار و نیمه گوشه هستند و مقداری قلوله سنگ و عدسی‌هایی از نهشته‌های ریزدانه با درصد‌های متفاوت ماسه و شن نیز در بین آن‌ها دیده می‌شوند. بنابراین، برپایه گزارش‌های ژئوتکنیکی ارایه شده،

ابتدای این قسمت از مسیر، ایستگاه زیرزمینی آزادی است و ادامه رو به سوی غرب و جنوب غربی اصفهان تا ایستگاه ابتدای آزاد راه ذوب آهن ادامه خواهد داشت. این بخش از متروی اصفهان، شامل تونل‌های نعل اسبی شکل به عرض ۶ متر و ارتفاع ۹/۵ متر است که با استفاده از روش حفاری NATM با الگوهای حفاری متفاوت تحت طراحی و ساخت می‌باشد.

در منطقه مورد بررسی خاک مسیر عمدتاً از نوع آبرفت رسی CL است. همچنین تراز آب زیرزمینی در مسیر تونل‌ها در محدوده ۱۵-۲۰ متری از سطح زمین قرار دارد. براین اساس با توجه به مطالعات انجام شده و گزارش‌های ارایه شده توسط سازمان قطار شهری استان اصفهان و شرکت مشاور مربوط به خط ۳ قطار شهری اصفهان، در منطقه مورد بررسی، مشخصات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مطابق جدول (۱) ارایه شده، است.

جدول ۱. خصوصیات ژئوتکنیکی ساختگاه محل احداث تونل مورد بررسی در این مطالعه (شرکت مهندسين مشاورين زمين فن آوران، ۱۳۹۵)

پارامتر	$\gamma_d (kN/m^3)$	$\gamma_{sat} (kN/m^3)$	$\Psi (deg)$	$\phi (deg)$	$C (kN/m^2)$
لايه ۱	۱۶/۵	۲۰	۰	۲۹	۱۵
لايه ۲	۱۹/۵	۲۲	۸	۴۵	۱۰

جدول ۲. پارامترهای پوشش نگهداری تونل (شرکت مهندسين مشاورين زمين فن آوران، ۱۳۹۴)

پارامتر	مدول تغيير شكل (GPa)	ممان اينرسی حول محور قوی (m^4)	ضريب پواسون (-)	وزن حجمی (kN/m/m)	ضخامت سازه (سانتي متر)
نگهداری اولیه	۱۰	$6/66 \times 10^4$	۰/۲	۴/۸	۲۰
نگهداری نهایی	۳۰	$2/25 \times 10^3$	۰/۲	۷/۲	۴۰

۲-۲- مشخصات پوشش تونل

با توجه به روش حفاری خط ۳ متروی اصفهان، می‌بایستی پس از حفاری یک قسمت از مقطع (یک گالری) ابتدا اقدام به نصب نگهدارنده اولیه برای مهاربندی نمود و پس از تعریض و حفر سایر قسمت‌ها، برای یک پارچه کردن مقطع نهایی و نگهداری و همچنین تثبیت آن از پوشش نگهدارنده نهایی استفاده کرد. به صورت کلی این پوشش با ترکیبی از شبکه‌های فلزی و لایه شاکریت بتن روی آن یا استفاده ورق‌های فولادی خم شده با پوشش‌های طراحی شده، احداث می‌شوند. در این پژوهش فارغ از نوع پوشش و متریکال مصرفی، پارامترهای پوشش‌های نگهدارنده موقت و اصلی تونل به شرح جدول ۲ ارائه شده است و در مدل سازی و محاسبه نشست‌ها برای محاسبه در نرم افزار، از این مقادیر استفاده شده است.

۲-۳- مشخصات پوشش تونل

در مسیر خط ۳ قطار شهری اصفهان، ۱۰ ساختمان شاخص وجود دارد که احتمال آن وجود دارد که حفر تونل مترو بر روی آن تاثیر منفی قابل توجهی نسبت به سایر منازل و سازه‌ها داشته باشد. پس از بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که با توجه به فاصله قابل قبول آنها از آکس تونل، اکثر آنها از حفر تونل آسیب جدی نخواهند دید. مهم‌ترین و حساس‌ترین ساختمان از نظر موقعیت نسبت به تونل و کاربری، ساختمان برج آزادی تشخیص داده شده است. لذا، ساختمان برج آزادی که از بین ساختمان‌های شاخص در طول مسیر، بیشترین درجه ریسک را دارد، به‌عنوان ساختمان مورد مطالعه انتخاب شده است. این ساختمان در ضلع شمالی خیابان ارتش و محدوده ایستگاه حکیم نظامی قرار دارد. مقدار Iv این ساختمان بر اساس جدول BCS مقدار ۵۵ به دست آمده است و با توجه به آن، این ساختمان در رده‌بندی ساختمان "کم اهمیت" از نظر رده ریسک قرار می‌گیرد. ابعاد ساختمان برج آزادی و فاصله آن نسبت به آکس تاج تونل در جدول (۳) بیان شده است.

جدول ۳. خصوصیات ساختمان برج آزادی و موقعیت آن نسبت به تونل

موقعیت ساختمان بر اساس کیلومتر مسیر	ارتفاع ساختمان (متر)	طول ساختمان (متر)	عرض ساختمان (متر)	حداقل فاصله تا محور تونل (متر)
۸۲۰+۰۴	۱۶	۲۵	۱۵	۸

جدول ۴. پارامترهای کنترلی ساختمان پس از حفر تونل و رده ریسک ساختمان برج آزادی سالنامه آماری استان اصفهان (۱۳۹۱)

پارامترها	$S_{max} (mm)$	β_{max}	ϵ_{max}	$(\Delta/L)_{max}$
پس از حفر تونل	10.5	$1/5 \times 10^{-3}$	$6/2 \times 10^{-4}$	0.2%
رده ریسک	2	1	2	
۲	زیبایی شناختی			

در تحلیل صحت سنجی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۲ تحلیل نتایج مربوط به صحت سنجی ارائه شده است.

۲-۳- شبیه سازی عددی تونل های خط ۳ مترو اصفهان

همانطور که پیشتر عنوان گردید، در این خط از روش تونل زنی اتریسی (NATM) برای حفاری استفاده شده است که یکی از روش های متداول دستی برای حفر تونل های کم عمق بوده و از انعطاف پذیری زیادی در مواجهه با شرایط ژئوتکنیکی متفاوت برخوردار است (Ng et al. 2004; Yoo and Kim 2008; Chen et al. 2012; Pejić 2013). تونل زنی به روش اتریسی معمولاً از طریق الگوهای مختلف انجام می گیرد. در این تحقیق به سه الگوی متداول این روش یعنی برش مستقیم، طاق- پاتاق و دیافراگم میانی (National Highway Institute, 2010). با هدف بررسی عملیات حفاری تونل تک در خاک با حالت خمیری بالا پرداخته شده است. شکل (۳) الگوهای حفاری مورد بررسی در این مطالعه را نشان می دهد. در این تحقیق منظور از اختلاف فاز در حفاری، ترتیب حفاری گالری ها و همچنین میزان فاصله تقدم و تاخر در هر روش حفاری برای شروع حفاری گالری جدید از گالری قبلی است. از آنجایی که در این تحقیق به بررسی سه روش کاملاً متفاوت به صورت همزمان پرداخته شده است، لازم است که این موضوع برای هر کدام به صورت مجزا و کامل شرح داده شود.

در روش برش حلقه ای، تمام مقطع در یک مرحله و بدون فازبندی، بدون هیچ گونه تقدم و تاخیری بصورت یکجا خاکبرداری می شود. تنها عامل مجزا کننده حفاری و فازهای حفاری و مدل سازی در این روش، طول گام های حفاری است. در روش حفاری طاق- پاتاق، ابتدا درگام اول فاز اول یک مقطع کامل از تونل حفر می گردد، سپس در دو گام بعدی همان فاز، گالری بالایی خالی می شود. در فاز بعدی لاینینگ گام دوم گذاشته شده و قسمت بالایی گام چهارم حفر می شود.

در فاز بعدی ابتدا لاینینگ گام سوم قرار داده شده و قسمت بالایی گام پنجم حفر گردیده و قسمت پایینی گام دوم نیز حفر می گردد. به همین طریق لاینینگ گذاری و حفاری ها ادامه پیدا می کند تا جایی که در گام آخر مقطع مورد بررسی به حفاری قسمت بالایی مقطع رسیده شود. در این زمان حفاری و ادامه مراحل را متوقف کرده و فاز بندی حفاری به مرحله آخر

رده بندی ساختمان "کم اهمیت" از نظر رده ریسک قرار می گیرد. ابعاد ساختمان برج آزادی و فاصله آن نسبت به آکس تاج تونل در جدول (۳) بیان شده است (شرکت مهندسی مشاورین زمین فن آوران و مهندسی مشاور فربر، ۱۳۹۴). با توجه به موقعیت قرارگیری این ساختمان نسبت به محور تونل، این ساختمان در پروفیل طولی بخش ۸۰۰+۰۴ قرار داشته و در این زون مورد بررسی قرار می گیرد. طبق جدول (۴) می توان پارامترهای نشست و زاویه چرخش ساختمان را در نظر گرفت (۱۳۹۱). با توجه به مقادیر رایج شده در جدول ۴ می توان رده ریسک ساختمان را پس از حفر تونل مشخص نمود. بزرگترین رده ریسک استخراج شده از پارامترهای کنترلی به عنوان رده ریسک ساختمان انتخاب می شود. با توجه به نتایج رده بندی ریسک ساختمان برج آزادی مطابق جدول ۴، بیشترین رده ریسک ۲ بوده، لذا، رده ریسک در نظر گرفته شده برای این ساختمان نیز جزو گروه ۲ بوده و جزو زیر گروه زیبایی- شناختی طبقه بندی می گردد و بنابراین عبور تونل تاثیر مخرب عملکردی بر روی این ساختمان ندارد و با عبور از این محدوده شاید تنها شاهد ترک های سطحی در دیوارهای این سازه باشیم.

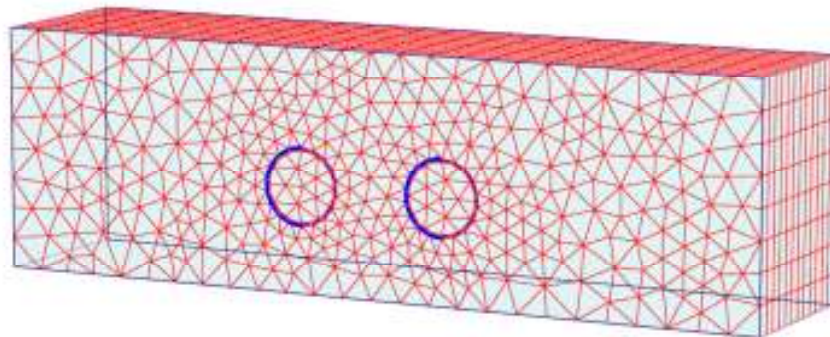
۳- مدل سازی عددی

۳-۱- صحت سنجی

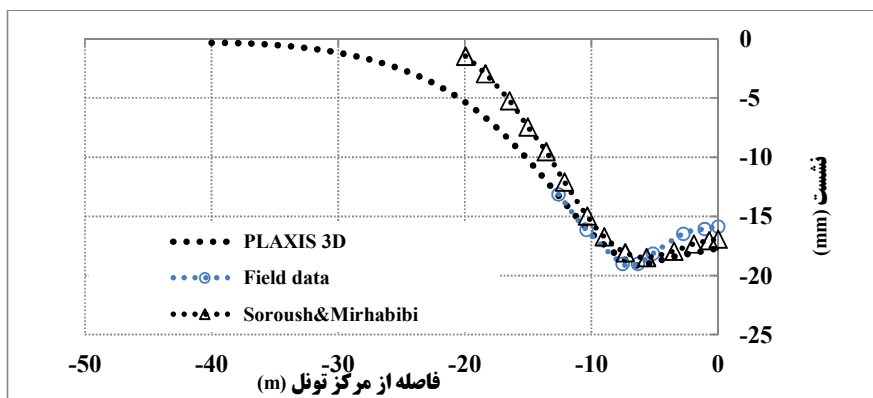
کد نرم افزاری PLAXIS 3D Tunnel در این پژوهش، جهت شبیه سازی عددی الگوی حفاری تونل های خط ۳ مترو اصفهان مورد استفاده قرار گرفته است. کد PLAXIS 3D Tunnel به عنوان یکی از کدهای نرم افزاری دقیق و کارآمد در زمینه مهندسی ژئوتکنیک و به طور خاص مهندسی تونل شناخته می شود. با این وجود، در این پژوهش پیش از انجام تحلیل ها و آنالیزهای مربوطه پیرامون بررسی رفتار الگوهای حفاری، یکسری مطالعات صحت سنجی پیرامون توان نرم افزار در زمینه مهندسی تونل انجام می شود تا اینکه دقت محاسبات انجام گرفته توسط این نرم افزار نشان داده شود. با توجه به در حال ساخت بودن مسیر خط ۳ مترو اصفهان، اطلاعات ابزارنگاری محدودی از این مسیر موجود می باشد. از سوی دیگر با توجه به اینکه هدف صحت سنجی نرم افزار و روش مدل سازی می باشد، لذا جهت نیل به این هدف، شبیه سازی های عددی اعتباربخشی شده با نتایج حاصل از پژوهش (Mirhabibi and Soroush 2012) مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۱ شبکه المان های مورد استفاده

از آن حفاری گالری بالا سمت چپ گام ششم و سپس حفاری گالری وسط از نیمه سمت چپ تونل در گام دوم شکل می‌گیرد. این روند به همین شکل و ترتیب ادامه پیدا خواهد کرد تا در گام آخر مقطع مورد بررسی تنها به حفاری گالری سمت چپ بالای مقطع تونل برسیم. در این هنگام کار مدل‌سازی و انجام فازبندی‌ها در این مدل از روش حفاری به اتمام رسیده است.

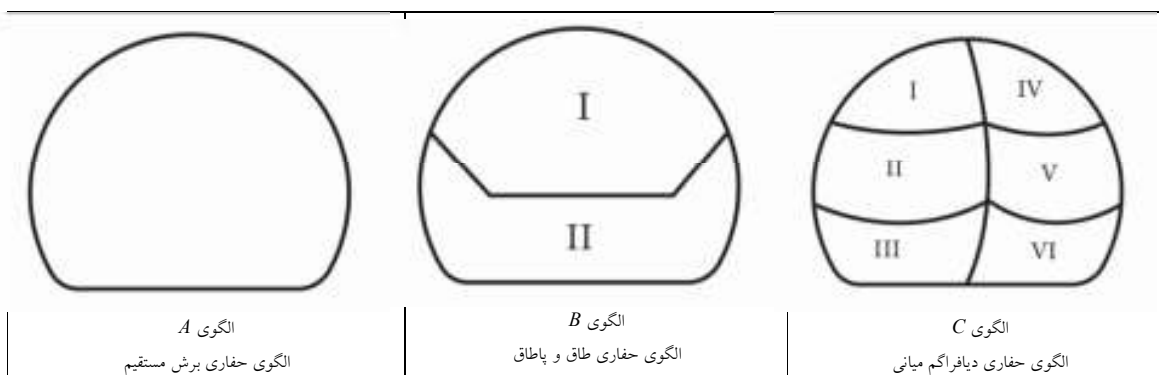
می‌رسد. در روش دیافراگم میانی نیز، ابتدا درگام اول فاز اول یک مقطع کامل از تونل حفر می‌گردد. سپس در دو گام بعدی همان فاز، گالری بالایی سمت چپ خالی می‌شود. در فاز بعدی حفاری، در گام دوم لاینینگ قسمت حفاری گذاشته شده و حفاری سمت چپ بالای برای گام چهارم شکل می‌گیرد. در فاز بعدی ابتدا لاینینگ گام دوم، سپس حفاری گام پنجم در سمت چپ بالا شکل می‌گیرد. در فاز چهارم ابتدا لاینینگ گام سوم، بعد



شکل ۱. شبکه المان‌ها و مش‌بندی در تحلیل عددی صحت‌سنجی



شکل ۲. شبیه‌سازی پروفیل نشست سطح زمین ناشی از حفاری تونل با PLAXIS 3D و مقایسه آن با نتایج نرم افزارهای دیگر



شکل ۳. الگوهای متداول حفاری تونل به روش اتریشی (NATM) و شرایط شبیه‌سازی آنها در تحقیق حاضر

۴-ارایه نتایج و بحث‌ها

۴-۱- تاثیر سربار سطحی

یکی از اهداف مطالعه حاضر، تاثیر مقدار سربار در نشست الگوهای حفاری مختلف تونل تک درون محیط خاک‌های سست و ریزشی است. در اولین قسمت، به بررسی توام تاثیرات سربار و اختلاف فاز حفاری پرداخته شده است. نتایج ارایه شده برای سه حالت مختلف سربار یعنی مقدار:

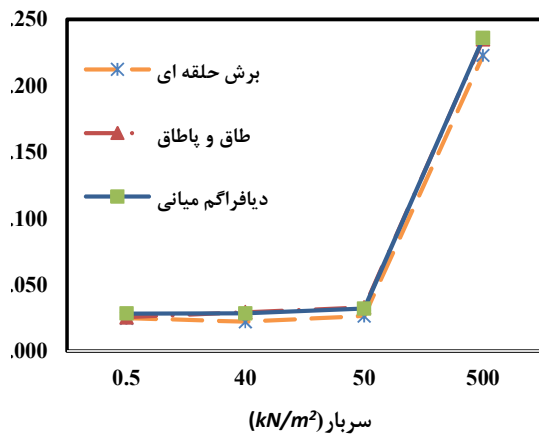
(الف) سربار بسیار ناچیز (۰/۵ کیلونیوتن به متر)

(ب) سربار متوسط (۴۰ و ۵۰ کیلونیوتن به متر)

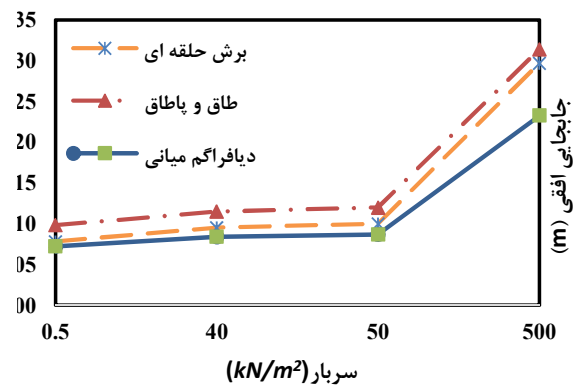
(ج) سربار زیاد (۵۰۰ کیلونیوتن به متر)

همانطور که در شکل (۴) دیده می‌شود، افزایش سربار در هر سه روش حفاری موجب افزایش جابجایی افقی شده است. همچنین به ازای یک سربار ثابت، مقدار جابجایی افقی در روش طاق-طاق بیشترین مقدار و در روش دیافراگم میانی کمترین مقدار است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سربار، اختلاف در جابجایی افقی در سه روش کمی بیشتر می‌شود. جابجایی در راستای قائم در سه روش حفاری مورد بررسی در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، جابجایی قائم با افزایش سربار افزایش یافته ولی مقدار آن مستقل از روش حفاری است.

کلی دو حالت امکان پذیر است و در این پژوهش به بررسی هر دو حالت پرداخته شده است. این دو حالت برای صفحه اعمال عبارتند از: حالت اول، زمانی که آکس صفحه اعمال سربار مورد نظر با آکس تونل در یک راستا بوده و این صفحه برای سیستم خروج از مرکزیتی ایجاد نکند و حالت دوم: زمانی که آکس صفحه اعمال سربار مورد نظر با آکس تونل در یک راستا نبوده و این صفحه برای سیستم خروج از مرکزیت ایجاد کند. همانطوری که در شکل (۴) دیده می‌شود، وجود خروج از مرکزیت بسته به روش حفاری باعث افزایش یا کاهش جابجایی قائم نسبت به حالت بدون خروج از مرکزیت شده است. در روش برش حلقه‌ای و طاق-طاق باعث افزایش و در روش دیافراگم میانی باعث کاهش شده است. نکته دیگر آنکه، زمانی که بار واقعی سازه با ابعاد پی سازه وارد می‌شود، در دو الگوی حفاری برش طاق و طاق _ طاق نشست‌ها و جابجایی‌های قائم با آهنگ بیشتری نسبت به روش دیافراگم میانی تغییر خواهد کرد. این موارد نشان می‌دهد که اثر روش حفاری تابعی از روش حفاری انتخابی است.



شکل ۵. جابجایی در راستای قائم هر سه روش حفاری برای سربارهای مختلف

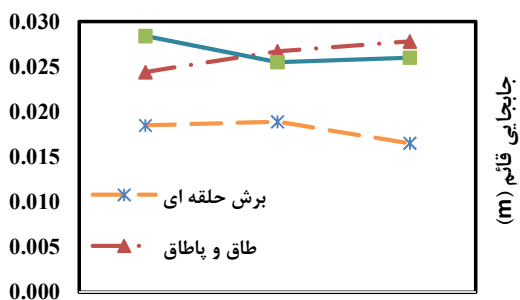


شکل ۴. جابجایی در راستای افقی هر سه روش حفاری برای سربارهای متفاوت

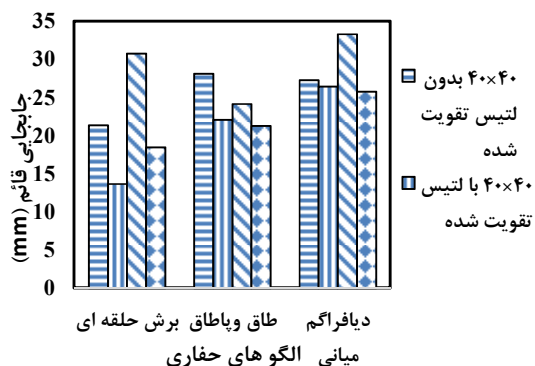
۴-۲- تاثیر سختی صفحات نگهدارنده موقت

در نرم افزار Plaxis 3D Tunnel توانایی مدل کردن شات‌کریت به همراه نگهدارنده‌های موقت به صورت یک پارچه امکان پذیر نیست و اگر این دو بصورت مجزا مدل شوند، به دلیل عملکرد جداگانه نرم افزار با خطا روبرو شده و یا نتایجی اشتباه را ارایه خواهد داد. در این تحقیق، سختی نگهدارنده‌ها، شات‌کریت‌ها و شبکه‌های فلزی را به صورت معادل در نظر گرفته

از آنجایی که تا به این قسمت از پروژه صفحه اعمال سربار یک صفحه ۴۰×۴۰ متر مربع بوده که در سرتاسر مقطع نیرو وارد شده است. ولی در واقع بزرگترین ساختمان منطقه دارای پی با ابعاد ۱۰×۲۵ متر است، لذا، به بررسی تاثیرات تغییر در ابعاد صفحه اعمالی بار نیز پرداخته شده است. نکته شایان ذکر در هنگام اعمال سربار با صفحه دارای ابعاد ۲۵×۱۰ این است که به صورت



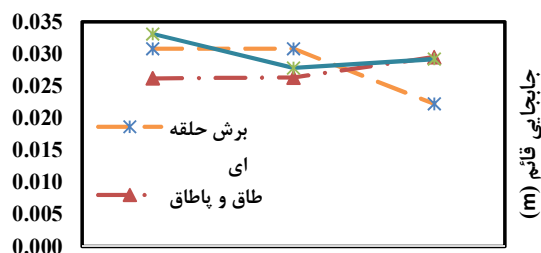
شکل ۷. جابجایی در راستای قائم هر سه روش حفاری برای ابعاد صفحه اعمالی بار متفاوت پس از افزایش مقادیر سختی صفحات نگهدارنده موقت



شکل ۸. بیشترین مقدار جابجایی قائم صفحات نگهدارنده موقت در سه الگوی حفاری

با توجه به نتایج حاصل در قسمت‌های قبل می‌توان گفت، خروج از مرکزیت تاثیر چندانی در این طراحی ندارد. در اینجا به بررسی نیروهای برشی و لنگرهای هر قسمت از نگهدارنده‌های موقت برای دو حالت زمان طراحی و زمان پس از تقویت شدن نگهدارنده‌های موقت پرداخته شده است. شکل (۸) بیشترین مقدار جابجایی نگهدارنده‌های موقت در هر سه الگوی حفاری را نشان می‌دهد. جدول (۵)، بیشترین مقدار نیروهای برشی نگهدارنده‌های موقت در هر سه روش حفاری را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در الگوی حفاری برش حلقه‌ای با افزایش سختی نگهدارنده‌ها و با تقویت آن از میزان نیروی برشی متحمل کاسته نشده بلکه در هر دو حالت بر مقدار نیروی برشی اعمالی نیز، افزوده شده است. ولی به صورت کلی صفحه نیروی وارده بیشترین مقدار نیرو، از آنجایی که برش به صورت یک مرحله‌ای بوده ثابت می‌ماند و دچار تغییرات صفحه‌ای نمی‌شود و همواره در یک راستا خواهد ماند.

شده است. برای مدل‌های جدید کیلونیوتن بر متر $EI=3.37 \times 10^5 \text{ kN. m}^2/m$ و $EA=45 \times 10^7$ در نظر گرفته شده است. در این حالت نتایج حاصل برای جابجایی‌ها در سه حالت مختلف ابعاد صفحات بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه شکل‌های (۶) و (۷) نشان می‌دهد که تقویت سختی‌ها و مقاومت صفحه نگهدارنده‌های موقت، در روش برش حلقه‌ای بسیار حائز اهمیت بوده و در این روش با افزایش مقادیر سختی، مقدار جابجایی قائم بطور محسوسی کاهش می‌یابد. در این روش بدلیل حفاری یک مرحله‌ای کل مقطع و خالی شدن ناگهانی آن بدون قرار دادن هرگونه پایدارسازی اولیه، نیروهای زیادی از خاک سرپاره با ارتفاع ۱۶ متر در منطقه مورد مطالعه به نگهدارنده‌های موقت وارد می‌شود که حتی گاهی تا آستانه تسلیم و عملکرد پلاستیک آنها را پیش خواهد برد. با تغییر سختی و تقویت نگهدارنده‌ها، توانایی نگهدارنده‌ها برای تحمل نیروها بالاتر رفته و در نتیجه تغییر شکل کمتر و جابجایی کمتری مشاهده خواهد شد. در دو روش دیگر از آنجایی که در مرحله حفاری هر قسمت، سایر قسمت‌ها وجود داشته و این امر می‌تواند به پخش کردن نیروها و تنش‌های اعمالی و همچنین به کنترل آنها کمک کند. بطوری که تغییرات سختی صفحه‌های نگهدارنده موقت دارای تاثیر زیادی مانند روش حفاری برش حلقه‌ای در نشست‌ها و تحمل نیروهای سرپاره وارده نیست. بار سرپاره اعمالی از این پس برابر ۴۰ کیلونیوتن بر متر با توجه به ساختمان برج آزاد در نظر گرفته شده است و از این پس به بررسی نیروهای برشی و لنگرهای موجود در لاینینگ‌ها برای این سرپاره پرداخته شده است. به هنگام مدل‌سازی مقطع تونل، نگهدارنده‌های موقت به ۸ قسمت متفاوت تقسیم‌بندی شده است.



شکل ۶. جابجایی در راستای قائم هر سه روش حفاری برای ابعاد صفحه اعمالی بار با اندازه‌های متفاوت

جدول ۵. بیشترین مقدار نیروهای برشی صفحات نگهدارنده موقت در سه الگوی حفاری بر حسب کیلونیوتن بر متر/متر

		۴۰×۴۰ بدون لتیس تقویت شده	۴۰×۴۰ با لتیس تقویت شده	۱۰×۲۵ بدون لتیس تقویت شده	۱۰×۲۵ با لتیس تقویت شده
برش حلقه‌ای	صفحه $x-y$	۱۲۴/۹۴	-۳۰۳/۵۷	۵۳/۶۳	۱۶۶/۵۵
	صفحه $y-z$	۲۳۶/۰۹	۶۸۳/۰۰	۴/۵۸	۲۰/۵۳
	صفحه $x-z$	۲۲۱/۶۲	۶۷۷/۲۶	-۱۹۷/۱۱	-۵۲۶/۰۰
طاق و پطاق	صفحه $x-y$	۸۰۰/۶۹	۴۷۹/۸۸	۳۴۸/۳۹	۶۸۲/۹۶
	صفحه $y-z$	۱۷۵/۱۰	۹۲۹/۵۲	-۱۳۱/۴۸	-۷۰۲/۴۳
	صفحه $x-z$	۴۶۴/۵۴	-۹۳۰/۶	۲۸۱/۰۲	۲۹۶/۷۶
دیافراگم میانی	صفحه $x-y$	۳۸۳/۶۲	۸۸۶/۶۷	۵۸۱/۶۴	-۶۰۴/۴۲
	صفحه $y-z$	-۳۰۷/۰۶	-۹۹۳/۲۹	۳۸۶/۹۶	-۶۴۹/۱۸
	صفحه $x-z$	۳۵۵/۸۵	۸۹۵/۱۷	-۲۲۸/۱۸	۹۵۵/۳۰

جدول ۶. بیشترین مقدار لنگرهای صفحات نگهدارنده موقت در سه الگوی حفاری بر حسب کیلونیوتن بر متر/متر

		۴۰×۴۰ بدون لتیس تقویت شده	۴۰×۴۰ با لتیس تقویت شده	۱۰×۲۵ بدون لتیس تقویت شده	۱۰×۲۵ با لتیس تقویت شده
برش حلقه‌ای	در راستای xx	-۱۲۱/۸۴	۷۳۷/۵۷	-۳۳۱/۴۸	۷۳۳/۹۸
	در راستای yy	۳۸/۵۴	۲۰۷/۶۱	-۲۲/۹۸	۱۰۹/۶۷
طاق و پطاق	در راستای xx	-۱۷۵/۸۸	۹۲۴/۸۲	-۱۴۷/۴۱	۸۵۲/۱۲
	در راستای yy	-۵۳/۶۷	-۱۷۵/۰۳	۴۵/۰۷	-۱۱۳/۲۵
دیافراگم میانی	در راستای xx	-۱۲۹/۷۴	۷۳۲/۳۲	-۱۴۹/۴۹	۷۸۹/۶۲
	در راستای yy	۸۷/۴۳	۴۵۰/۱۶	-۵۱/۴۲	-۲۴۲/۰۶

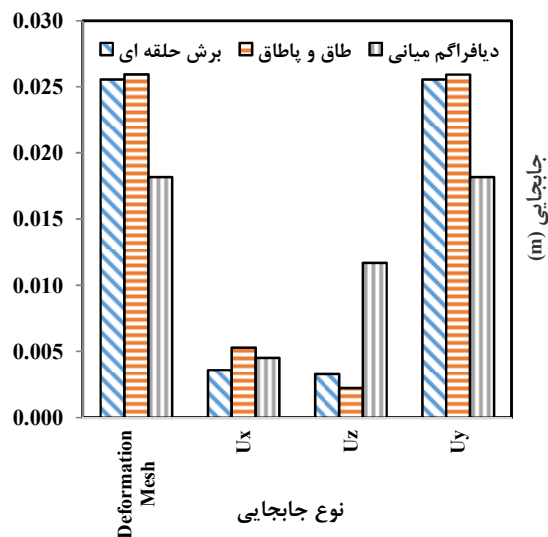
۴-۳- تاثیر الگوی حفاری

تونل مورد بررسی در این تحقیق دارای مقطعی تقریباً نامتقارن بوده و شکلی مابین تونل‌های تخم‌مرغی و نعل اسبی دارد. همانطور که در نتایج ارایه شده در قبل مشاهده شده است، نتایج نشست‌ها و تغییر مکان‌های قائم در سه حالت حفاری تونل دارای شرایط یکسان و آهنگ تغییرات مشخص و یکسانی نیست، از این جهت در اینجا به بررسی نوع مقطع عرضی تونل پرداخته شده است. با توجه به مطالعات گذشته و همچنین با توجه به قطر تونل، تونل دایره‌ای شکل با قطر معادل شش متر و با مشخصات نگهدارنده و سایر موارد قبل در اینجا مدل شده است. شایان ذکر است. در این مدلسازی از سربار معادل ۴۰ کیلونیوتن بر متر و سختی $EI = 3/37 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$ و $EA = 4/5 \times 10^7 \text{ kN/m}$ استفاده شده است. در ضمن مشخصات لایه‌های خاک و سطح ایستایی همچون موارد بیان شده در مورد نمونه اصلی است. برای این مدل سازی از دو اندازه ۴۰×۴۰ و ۱۰×۲۵ متر

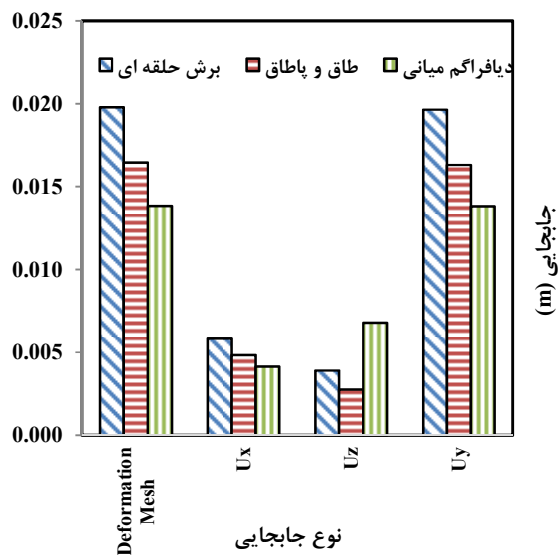
اما در دو الگوی دیگر حفاری، یعنی طاق - پطاق و دیافراگم میانی با افزایش سختی صفحات نگهدارنده، صفحه اعمال حداکثر نیروی برشی تغییر جهت خواهد داد و با توجه به ترتیب انتخاب گالری‌ها این جهات دچار تغییرات خواهد شد. جدول (۶) بیشترین مقدار لنگرهای وارده بر نگهدارنده‌های موقت در هر سه الگوی حفاری را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۶، می‌توان گفت در راستای حفاری تونل فارغ از نوع الگوی حفاری اعم از برش حلقه‌ای، طاق - پطاق و دیافراگم میانی بیشترین لنگر وارد خواهد شد. از همین رو در هنگام حفاری و همچنین زمان نصب صفحات نگه دارنده، تنها می‌بایستی لنگر در راستای طول مورد بررسی قرار گرفته و کنترل‌های مربوط به آن مورد توجه و ارزیابی قرار گیرد.

با ابعاد صفحه اعمال بار 10×25 در هر سه الگو حفاری را نشان می‌دهد. در اشکال (۹) و (۱۰) ارایه شده در فوق، منظور از *Deformation Mesh* تغییرات در شبکه بندی کلی مدل با اعمال سربار و ابعاد مورد نظر است. U_x جابجایی‌ها در راستای افق، U_z جابجایی‌ها در محور عمود بر صفحه و منظور از U_y مقادیر جابجایی‌ها در راستای قائم یا همان‌ها نشست‌ها است.

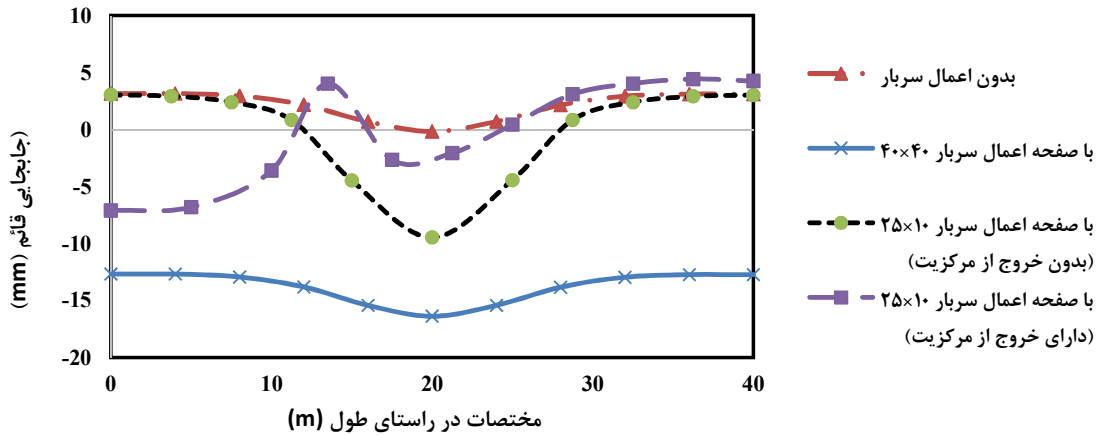
مربع برای صفحه سربار اعمالی استفاده شده است. شکل (۹) مقدار جابجایی برای اعمال سربار 40 کیلو نیوتون با ابعاد صفحه اعمال بار 40×40 در هر سه الگو حفاری را نشان می‌دهد. با تغییر مقطع عرضی به شکل دایره‌ای، آهنگ تغییرات منظم شده و می‌توان به راحتی مشاهده کرد که انتخاب روش حفاری دارای چه تاثیری بر روی منطقه مورد مطالعه دارد و این تغییرات تقریباً ثابت بوده و می‌توان به راحتی مرحله بعد را قضاوت کرد. شکل (۱۰) جابجایی برای اعمال سربار 40 کیلو نیوتن بر متر



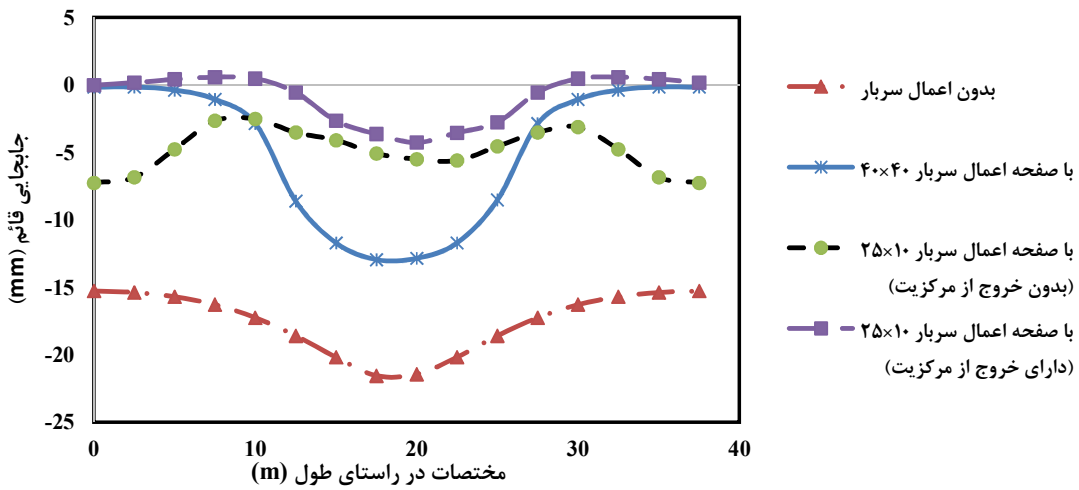
شکل ۷. جابجایی برای اعمال سربار 40 کیلو نیوتن بر متر با ابعاد صفحه اعمال بار 40×40 در هر سه الگو حفاری



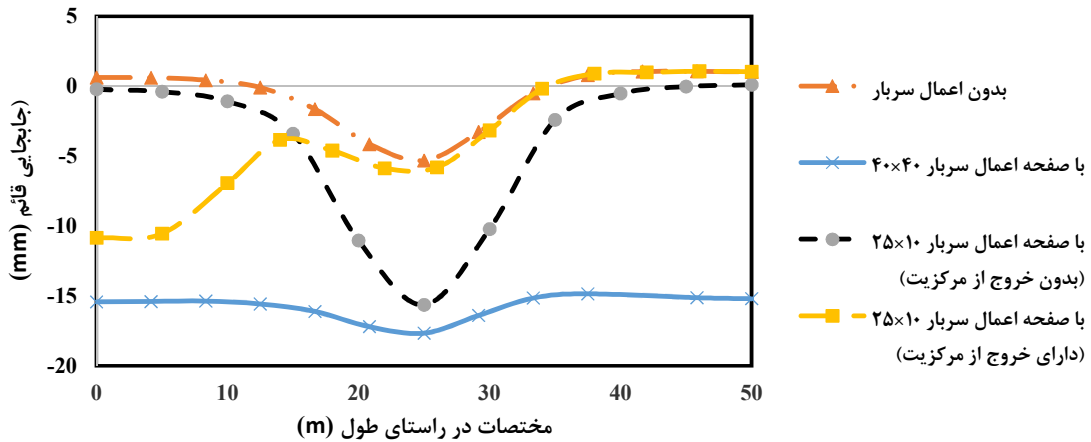
شکل ۸. جابجایی برای اعمال سربار 40 کیلو نیوتن بر متر با ابعاد صفحه اعمال بار 10×25 در هر سه الگو حفاری



شکل ۹. نشست سطحی برای روش برش حلقه‌ای



شکل ۱۰. نشست سطحی برای روش طاق و پطاق



شکل ۱۱. نشست سطحی برای روش دیافراگم میانی

قرار گرفت. در این بررسی‌ها مشاهده شد با اعمال حداکثر بار سربار منطقه به توجه به این طرح‌ها، منطقه اطراف تونل به محیط پلاستیک وارد می‌شود. از این رو به بررسی و ارایه نیروی سربار حداکثری منطقه به توجه به عدم ورود به ناحیه پلاستیک پرداخته شد و میزان بار بدست آمده را به عنوان بار اعمالی پروژه برای بقیه مدل‌سازی‌ها قرار گرفت. در طراحی‌های نگهدارنده‌های موقت در روش حفاری NATM، در الگوی برش حلقه‌ای قسمت‌های جانبی نگهدارنده‌ها یعنی قسمت‌های موجود در طرفین تونل، در الگوی حفاری طاق - پطاق نگهدارنده‌های موقت در تاج تونل و در الگوی حفاری دیافراگم میانی بایستی نگهدارنده‌های موقت در سمتی از تونل که حفاری شکل نمی‌گیرد، مورد توجه ویژه قرار گیرند. با تغییر مقطع عرضی به شکل دایره‌ای با قطر معادل، آهنگ تغییرات منظم شده و می‌توان مشاهده کرد انتخاب روش حفاری دارای چه تأثیری بر روی منطقه مورد مطالعه دارد و این تغییرات تقریباً ثابت بوده و می‌توان به راحتی مرحله بعد را قضاوت کرد. در بررسی‌ها انجام گرفته حتی می‌توان دید که هر چه مقطع نزدیک‌تر به دایره کامل باشد، دارای آهنگ تغییرات منظم‌تر و یکنواخت‌تری خواهد بود. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که پس از حفر تونل در صورت عدم اعمال سربار، اتساع رخ خواهد داد. اتساع در روش برش حلقه‌ای بسیار شدید بوده که علت آن می‌تواند حفر یک مرحله‌ای مقطع باشد. در این روش محاسباتی چسبندگی کاذب به دلیل خالی شدن یک مرحله‌ای تونل در عرض زیاد رخ خواهد داد و اتساع زیادی را می‌توان دید. در الگوهای طاق - پطاق و دیافراگم میانی نیز اتساع دیده می‌شود ولی به دلیل حفر مرحله‌ای مقطع تونل، خاک‌های موجود باعث تقلیل این تغییرات شده و موجب پایدار ماندن خاک‌ها در سطح زمین و اطراف جداره‌های تونل هنگام حفاری می‌شوند و از به وجود آمدن آهنگ تغییرات ناگهانی در هنگام حفر جلوگیری می‌کنند. در هنگام حفاری جابجایی‌های افقی در راستای X نیز وجود دارد.

از جمله عوامل این جابجایی‌ها عدم تقارن در لایه‌های خاکی، مراحل، زمان حفاری و همچنین مرحله‌ای بودن حفاری است. از این رو می‌بایست در حفاری‌های چند مرحله‌ای علاوه بر سیستم نگهدارنده‌های موقت و جابجایی‌های در راستای قائم (نشست‌ها) به جابجایی‌ها افقی نیز توجه شود و در این راستا نیز ابزارنگاری‌هایی لازم و روند تغییرات نیز مورد بررسی و کنترل شود. در زمان اعمال بار دارای خروج از مرکزیت یک اغتشاش در آهنگ تغییرات نشست‌های سطحی مشاهده می‌شود. علت این رخ داد، کوچک بودن عرض منطقه مورد مطالعه و فاصله کم ما

در ادامه به مقادیر نشست سطحی در سه الگوی حفاری برش حلقه‌ای، دیافراگم میانی و طاق-طاق و مقایسه آنها پرداخته شده است. در اینجا نیز مقدار سربار ۴۰ کیلو نیوتن بر متر و مقادیر سختی نگهدارنده‌های موقت نیز برابر با $EI \text{ kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$ و $EA = 4/5 \times 10^7 \text{ kN/m}$ در نظر گرفته شده است. مقادیر نشست سطحی برای روش برش حلقه، طاق-طاق و دیافراگم میانی به ترتیب در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است. با توجه به شکل (۱۱) می‌توان گفت در اثر حفاری و در شرایط بدون اعمال سربار با توجه به استفاده از مدل موهر - کولمب یک بالازدگی و اتساع رخ می‌دهد. روند نشست‌ها تقریباً قابل پیش بینی است و تنها نکته حائز اهمیت نحوه تغییرات نمودار نشست برای حالتی که آکس صفحه اعمال بار در امتداد آکس تونل واقع ناست و مقدار اتساع و نشست رخ داده است. با توجه به شکل (۱۰) می‌توان گفت در اثر حفاری تونل با الگوی طاق-طاق تمامی نمودارها و تغییرات و همچنین روند این تغییرات بسیار متفاوت از حالت برش حلقه ای است. نکته شایان ذکر کاهش مقدار نشست در زمان اعمال نیروی سربار نسبت به حالت بدون اعمال سربار است. به دلیل وجود یک نیروی وزنی قوی در هنگام حفاری نیم رخ بالایی، حتی زمانی که نیروی سربار اعمالی نسبت به آکس تونل دارای خروج از مرکزیت باشد، نمودار تغییرات شدیدی نخواهد شد و وجود این نیروی وزنی سبب تقلیل و کاهش این تغییرات و تقریباً ثابت بودن روند کلی می‌شود. در روش برش دیافراگم میانی، روند کلی تغییرات بسیار شبیه به حالت برش حلقه‌ای است اما به دلیل وجود یک نیروی وزنی، نشست‌ها و مقادیر اختلافشان کم‌تر نسبت به برش حلقه‌ای است و اختلاف زیادی میاد مقادیر نخواهد بود.

۵- نتیجه گیری

با توجه به شرایط زمین شناختی و شرایط ژئوتکنیکی منطقه مورد بررسی، برای انتخاب مقدار سربار اعمالی می‌بایستی دقت ویژه‌ای داشت. باتوجه به ساختمان‌های موجود در منطقه ابتدا اقدام به در نظر گرفتن سرباری کم معادل سازه‌ها موجود منطقه شد که پس از مدل سازی و بررسی نتایج، تغییرات و جابجایی‌های قابل توجهی وابسته به این نیروی اعمالی رخ نداد. از این رو تصمیم به افزایش مقدار نیروی سربار گرفته شد، برای این کار با توجه به طرح‌های تفصیلی و توسعه منطقه مورد مطالعه سربار دیگری متناسب با رویکرد و تراکم منطقه مورد بررسی

به دلیل خالی شدن نصف دیگر تونل، شاهد تغییرات متفاوت و غیرقابل پیش بینی می‌توان بود. در این نوع روش حفاری می‌باید تمامی جهات و تغییرات را به دقت مورد بررسی و ابزارنگاری‌های دقیق قرار داد. با توجه به بررسی‌ها صورت گرفته و نتایج حاصل شده، برای حفاری منطقه مورد نظر روش دیافراگم میانی با مقطع نعل اسبی پیشنهاد می‌شود. در این روش نه تنها آهنگ تغییرات دارای نوسانات زیادی نبوده بلکه بصورت کلی می‌توان تغییرات و جایجایی‌ها را تا حد زیادی پیش‌بینی کرد و تقریباً موازی با نتایج حاصل بیان نمود.

بین آکس تونل تا آکس صفحه اعمال سربار است و خاک توانایی تقلیل و خنثی کردن این تغییرات را در چنین فاصله کمی ندارد و توان میرا کردن خاک در چنین فواصل کمی بسیار ناچیز در این حجم از خاکبرداری است. از این رو یک اتساع و یک نشست اتفاق می‌افتد.

در روش برش حلقه ای به دلیل حفر یک مرحله ای و بدون مکث و همچنین عدم وجود هیچگونه عامل وزنی یا عامل استحکام بجز نگهدارنده‌های موقت، در تمامی حالات آهنگ تغییراتی شدید دارد که بایستی برای کنترل آن نیز تدابیری خاص اتخاذ شود. در روش طاق - پاتاق به دلیل حفر دو مرحله‌ای و عدم امکان همسان شدن حرکات خاک با مقطع تونل با وجود یک عامل وزنی در پایین تونل و عدم توانایی حفظ ثبوت مقطع

۶- مراجع

- in estimating ground surface settlement of twin- and quadruple-tube tunnels", *Tunn Undergr Sp Technol* 28:135-149.
doi: 10.1016/j.tust.2011.10.005.
- Chen SL, Lee SC, Gui MW., (2009), "Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels", *Tunn Undergr Sp Technol* 24, pp.148-154.
doi: 10.1016/j.tust.2008.05.006.
- de Farias MM, Moraes ÁH, de Assis AP., (2004), "Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3-D numerical simulations", *Tunn Undergr Sp. Technol* 19, pp.283-293.
doi: 10.1016/j.tust.2003.11.006.
- Desari, G. R., Rawlings, C. G., & Bolton MD Desari, G. R., Rawlings, C. G., & Bolton, M. D., (1996), "Numerical Modelling of a NATM Tunnel Construction in London Clay", *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground at London*, pp. 491-496.
- Dimmock PS., Mair RJ., (2008), "Effect of building stiffness on tunnelling-induced ground movement", *Tunn Undergr Sp Technol* 23, pp.438-450.
doi: 10.1016/j.tust.2007.08.001.
- Gupta S, Liu WF, Degrande G, et al., (2008), "Prediction of vibrations induced by underground railway traffic in Beijing", *J Sound Vib* 310, pp.608-630.
doi: 10.1016/j.jsv.2007.07.016.
- Jones S, Hussein M, Hunt H., (2010), "Use of PiP to investigate the effect of a free surface on ground vibration due to underground
- سالنامه آماری استان اصفهان، (۱۳۹۱)، "شرکت مهندسين مشاورين زمين فن‌آوران"، گزارش مطالعات نهایی ژئوتکنیک مسير.
- شرکت مهندسين مشاورين زمين فن‌آوران، مهندسين مشاور فربر، (۱۳۹۴)، "بررسی روش‌های مختلف اجرا در طول کل مسير طرح خط ۳ قطار شهری اصفهان"، مهندسين مشاور فربر.
- Anagnostou G Anagnostou, G., (2007), "Continuous Tunnel Excavation in a Poro-Elastoplastic Medium", *Proceedings of the 10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics: NUMOG X.*, Rhodes. Taylor & Francis Group. ISSN: 9780415440271, pp. 183-188.
- Broere W., (2016), "Urban underground space: Solving the problems of today's cities", *Tunn Undergr Sp Technol* 55, pp.245-248.
doi: 10.1016/j.tust.2015.11.012.
- Burd, H. J., Houlsby, G. T., Augarde, C. E., & Liu G Burd, H. J., Houlsby, G. T., Augarde, C. E., & Liu, G., (2000), "Modelling Tunnelling-Induced Settlement of Masonry Buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, Vol. 143*, pp. 17-29.
<http://www-civil.eng.ox.ac.uk/pe>.
- Chakeri H., Hasanpour R., Hindistan MA, Ünver B., (2011), "Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling", *Bull Eng Geol Environ* 70, pp. 439-448.
doi: 10.1007/s10064-010-0333-8.
- Chen SL, Gui MW, Yang MC., (2012), "Applicability of the principle of superposition

- Ng CWW, Lee KM, Tang DKW., (2004), "Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunnelling method (NATM), twin tunnel interactions, *Can Geotech J.* 41, pp.523–539.
doi: 10.1139/T04-008.
- Ocak, I., (2008), "Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro. *Tunn Undergr Sp Technol* 23, pp.674–681.
doi: 10.1016/j.tust.2007.12.005.
- Pejić., (2013), "Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection", Pergamon.
- Sun Y, Xu YS, Shen SL, Sun WJ., (2012), "Field performance of underground structures during shield tunnel construction", *Tunn Undergr Sp Technol* 28, pp.272–277.
doi: 10.1016/j.tust.2011.11.010.
- Svoboda T, Mašin D, Boháč J., (2010), "Class A predictions of a NATM tunnel in stiff clay", *Comput Geotech* 37, pp.817–825.
doi: 10.1016/j.compgeo.2010.07.003.
- Tang, D. K. W., Lee, K. M., & Ng CWW
Tang, D. K. W., Lee, K. M., & Ng, C. W. W., (2000), "Stress Paths around a 3-D Numerically Simulated NATM Tunnel in Stiff Clay", *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground at Tokyo*, pp. 443-4.
- Vermeer, P. A., Bonnier, P. G., & Maoller SC
Vermeer, P. A., Bonnier, P. G., & Maoller, S. C., (2002), "On a Smart Use of 3D-FEM in Tunnelling", *Proceedings of the 8th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics* pp. 361-366. Rotterdam: A. A. Balkema. ISBN: 905809359X.
- Wang HN, Chen XP, Jiang MJ, et al., (2018), "The analytical predictions on displacement and stress around shallow tunnels subjected to surcharge loadings", *Tunn Undergr Sp Technol* 71, pp.403–427.
doi: 10.1016/j.tust.2017.09.015.
- Yoo C., Kim S Bin., (2008), "Three-dimensional numerical investigation of multifaced tunneling in water-bearing soft ground", *Can Geotech J* 45, pp.1467–1486.
doi: 10.1139/T08-071.
- railways", *Acoust Aust* 38, pp.20–24.
- Karakus M, Ozsan A, Başarir H., (2007), "Finite element analysis for the twin metro tunnel constructed in Ankara Clay", Turkey. *Bull Eng Geol Environ* 66, pp.71–79.
doi: 10.1007/s10064-006-0056-z.
- Katzenbach, R., & Breth H
Katzenbach, R., & Breth, H., (1981), "Nonlinear 3D Analysis for NATM in Frankfurt Clay", *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 315-318. Rotterdam: Balkema. ISBN: 9061912105.
- Lee, G. T. K., & Ng CWW
Lee, G. T. K., & Ng, C. W. W., (2002), "Three-Dimensional Analysis of Ground Settlements due to Tunnelling: Role of K₀ and stiffness Anisotropy", *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*.
- Li S., Shangguan Z., Cao L., (2015), "Influences of ground loss ratios on internal force characteristics on segments of tunnel linings", *Electron J Geotech Eng* 20, pp.4223–4232.
- Li S, Yuan C, Feng X, Li S., (2016), "Mechanical behaviour of a large-span double-arch tunnel", *KSCE J Civ Eng* 20, pp.2737–2745.
doi: 10.1007/s12205-016-0456-y.
- Liu HY, Small JC, Carter JP., (2008), "Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region", *Tunn Undergr Sp Technol* 23, pp.399–420.
doi: 10.1016/j.tust.2007.06.009.
- Mathew G V., Lehane BM, (2013), "Numerical back-analyses of greenfield settlement during tunnel boring", *Can Geotech J* 50, pp.145–152.
doi: 10.1139/cgj-2011-0358.
- Mirhabibi A, Soroush A., (2012), "Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements", *Tunn Undergr Sp Technol* 29, pp.40–51.
doi: 10.1016/j.tust.2011.12.009.
- Möller SC, Vermeer PA., (2008), "On numerical simulation of tunnel installation", *Tunn Undergr Sp Technol* 23, pp.461–475.
doi: 10.1016/j.tust.2007.08.004.
- National Highway Institute (US), (2010), Parsons, Brinckerhoff, & Quade & Douglas, "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels civil Elements", AASHTO.

Selection of Optimal Single Tunnel Drilling Method in Soil

(Case Study: Isfahan City Train Line 3)

Omid Khosravi, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Meysam Bayat, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

E-mail: bayat.m@pci.iaun.ac.ir

Received: July 2022- Accepted: November 2022

ABSTRACT

Today, with the advancement of technology, the relative ease of drilling and underground construction, many countries have turned their attention to the construction of underground space. The need for an underground transportation system is evident in most major cities around the world, especially in areas with traffic congestion. This system requires a tunnel structure that is constructed in urban areas, mainly on loose lands and in shallow parts, and its impact can extend to the ground level. The choice of the best method for drilling these tunnels is a function of the soil characteristics, cross section and location of the tunnel, which should be considered according to the drilling area. In this paper, the mentioned cases have been investigated for Isfahan metro line 3 in the area of agricultural station which is to be drilled by NATM method in order to find the optimal drilling condition. The results show that the choice of drilling method pit can have significant effects on subsidence, tunnel cross-section deformation and horizontal displacement at the ground level. Based on the results, the effect of loading conditions, installation geometry, drilling pattern, different arrangement of surface structures, amount of overhead, dimensions of overhead application plate on tunnel behavior have been investigated.

Keywords: Tunnel, Surface subsidence, Drilling pattern, PLAXIS, NATM