

تأثیر مخروطی بودن سپر حفاری در جابجایی و بار وارد بر خط لوله در زمین‌های لایه‌ای طی عملیات لوله رانی

پژوهشی

رضا محمدپور^۱؛ احسان طاهری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، R.mohammadpour@modares.ac.ir
۲- استادیار؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، e_taheri@modares.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۱/۱۸

شماره صفحات: ۲۷۱ تا ۲۸۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.11623.1446

واژگان کلیدی	چکیده
لوله رانی سپر حفاری مخروطی جابجایی زمین زمین لایه‌ای المان محدود تحلیل حساسیت	امروزه اکثر سازه‌های زیرزمینی بصورت مکانیزه و با استفاده از سپرهای حفاری ایجاد می‌شوند. از چالش‌های اساسی در سازه‌های زیرزمینی تغییر شکل زمین است که تحلیل آن برای اهداف ایمنی و طراحی پروژه امری لازم و ضروری است. یکی از پارامترهای مؤثر در جابجایی زمین، شکل و هندسه سپر حفاری می‌باشد. با توجه به این که در عملیات لوله‌رانی لوله‌ها متصل به سپر حفاری هستند بنابراین اجازه رهایی تنش و جابجایی اولیه به محیط داده نمی‌شود. پس مخروطی لحاظ کردن سپر حفاری می‌تواند این مشکل را حل کند. این مطالعه تأثیر مخروطی بودن سپر حفاری در جابجایی زمین را مورد بررسی قرار داده و با سایر پارامترهای اساسی مقایسه شده است. از نرم افزار المان محدود پلکسیس برای مدل‌سازی عددی استفاده شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج به دست آمده از مطالعات میدانی و تحلیلی کالیبره شده است. تأثیر بار وارد بر خط لوله نیز از فاکتورهایی است که مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مشخص گردید که رابطه مخروطی بودن سپر حفاری با جابجایی سطح زمین بصورت خطی می‌باشد. بار وارد بر خط لوله نیز با افزایش مخروطی بودن سپر از ۰/۳٪ به ۰/۹٪ تقریباً دو برابر می‌شود. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این پژوهش، امکان کنترل جابجایی زمین با توجه پارامترها می‌باشد.

می‌شوند (Gholamreza Zadeh, 2022).

لوله‌رانی یکی از روش‌های معمول ساخت زیرزمینی بدون ترانشه است (Jia, 2019; Song, 2018; Song, 2020) و دارای مزایای زیادی از جمله عدم اختلال در ترافیک سطحی، کارایی بالا و آلودگی کم می‌باشد (Ji, 2019; Ni, 2018). با توجه به عواملی مانند فناوری ساخت، سرعت ساخت و مزایای اجتماعی و اقتصادی، لوله‌رانی مزایای آشکاری در ساخت کانال‌های زیرزمینی را داراست

۱- پیش‌گفتار

با توسعه استفاده از فضاهای زیرزمینی شهری مانند تونل‌ها، ایستگاه‌های زیرزمینی و فضاهای تجاری، ساخت تأسیسات زیرزمینی پیشرفت زیادی کرده است (Song, 2019; Tian, 2019). فناوری‌های بدون ترانشه به دلیل اجتناب از حفاری‌های روباز و کاهش آسیب به زیرساخت‌های مجاور به‌طور گسترده‌ای برای راه‌اندازی خط لوله‌های جدید استفاده

بررسی کردند و رابطه بین هر یک از پارامترها و نشست سطح ارائه دادند. این روابط حساسیت هر پارامتر را در نشست مشخص می‌کند. در نهایت، رابطه‌ای بین حداکثر نشست سطح و تغییر شکل خطوط لوله برای سختی نسبی مختلف لوله و خاک پیشنهاد شد (Zhang, 2019).

زلین و همکاران در سال ۲۰۲۰ تغییر شکل‌های ناشی از عملیات لوله رانی تحت تأثیر تنش اضافی، اصطکاک و تخریب خاک در مترو شماره ۶ کومینگ مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که منحنی نشست عمودی سطح تقریباً به شکل "S" است که می‌توان آن را به زون وقوع برآمدگی، زون نشست حساس، زون پایدار و زون نشست برگشتی تقسیم کرد. نتایج کلی حاصل از این تجزیه و تحلیل بدین صورت بود که نشست طولی عمدتاً در محدوده ۱/۵ متر تا ۱۵ متر در مقابل صفحه حفاری متمرکز است، در حالی که نشست عرضی عمدتاً در محدوده ۱/۵ برابر عرض لوله در دو طرف محور خط لوله رخ می‌دهد (Niu, 2020).

مخروطی لحاظ کردن سپر حفاری در عملیات لوله‌رانی از مسائلی است که کمتر مورد توجه بوده و تأثیر آن در جابجایی زمین بررسی نشده است. در این مطالعه به تجزیه و تحلیل تأثیر میزان مخروطی بودن سپر حفاری در جابجایی زمین و رابطه آن با نشست سطح زمین و همچنین شاخص حساسیت آن پرداخته می‌شود. علاوه بر این برخی از پارامترهای اساسی که در جابجایی زمین نقش اساسی دارند نیز بررسی شده و مورد مقایسه قرار گرفتند. بررسی‌های انجام گرفته در زمین لایه‌ای و زیر سطح آب زیرزمینی می‌باشد و پروژه و شرایط بصورت فرضی انتخاب شده است. نرم افزار المان محدود پلکسیس سه بعدی و نسخه ۲۰۲۰ جهت شبیه سازی انتخاب شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه موردی

در مطالعه موردی هفت لایه خاک وجود دارد و قطر خارجی ۳۳۰۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۲۷۲۰ میلی‌متر و طول یک حلقه تک لوله ۲ متر و در مجموع ۱۰۰ حلقه می‌باشد. مطابق شکل ۱، خط لوله بین سیلت و خاک رس‌سیلنتی قرار داشته و ارتفاع روباره ۲۷۵۰ میلی‌متر می‌باشد. قسمت جک

(Wang, 2020; Zhang, 2019).

با این حال، عواملی از جمله لرزش زمین، برهم کنش بین لوله و خاک، تخریب خاک، تنش اضافی و اصطکاک در لوله‌رانی جابجایی زمین را به دنبال خواهد داشت که به طور جدی ایمنی سازه‌های موجود را تهدید می‌کند (Chen, 2019; Wu, 2020; Yin, 2020).

لوله رانی اوایل سال ۱۸۹۶ برای نصب یک آبریز بتنی در زیر راه‌آهن شمال اقیانوس آرام در آمریکا استفاده شد و یک روش جدید حفاری با ماشین اوگر در قطر کوچک از سال ۱۹۳۶ در ایالات متحده آغاز شد. با وجود این لوله‌رانی تا سال ۱۹۵۰ در ایالات متحده محبوبیت خاصی پیدا نکرده بود (Barbera, 1993). لوله رانی در اواخر قرن نوزدهم نیز در وین مورد توجه قرار گرفت (Thomson, 2009).

در روش لوله‌رانی فاصله‌ای بین (دنباله سپر و اولین سگمنت وارده شده) وجود ندارد. به عبارتی سگمنت متصل به سپر حفاری است. بنابراین به زمین اجازه جابجایی الاستیک و رهایی تنش داده نمی‌شود. به همین علت بار وارده بر سگمنت‌ها زیاد خواهد بود. نیروی مورد نیاز برای حرکت سپر حفاری و سگمنت‌ها نیز از طریق جک‌هایی که در چاه ارسال قرار دارد تأمین می‌شود. یکی از راهکارها می‌تواند اضافه حفاری از طریق مخروطی در نظر گرفتن سپر حفاری باشد. در این صورت اجازه جابجایی اولیه به محیط داده شده و تنش‌های وارده بر خط لوله از مقدار بیشینه کمتر خواهد شد.

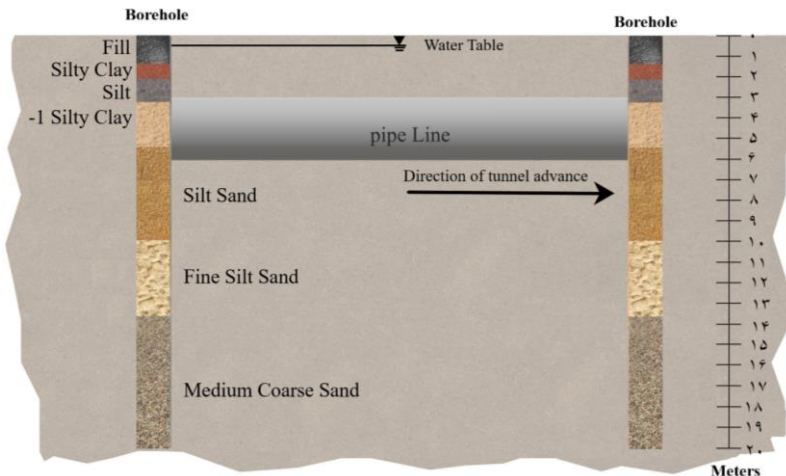
مطالعاتی نیز قبلاً در مورد تأثیر مخروطی بودن سپر حفاری در جابجایی زمین توسط مولون و همکاران در سال ۲۰۱۳ و همچنین دیاس و همکارانش انجام گرفت (Mollon, 2013; Dias, 2000).

اضافه حفاری، برای همگرایی زمین ایجاد می‌شود و توزیع یکنواخت جریان روان‌کننده را در اطراف خط لوله تسهیل می‌کند (FSTT, 2006; Bergeson, 2014).

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک مدل اجزای محدود سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس توسعه دادند. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای مدول کشسان خاک، میزان رهایی تنش، ضرایب فشار جانبی، مدول کشسان خط لوله و عمق مدفون در جابجایی زمین مورد بررسی قرار گرفت. آنها همچنین اثرات حفاری در جابجایی خط لوله موجود را

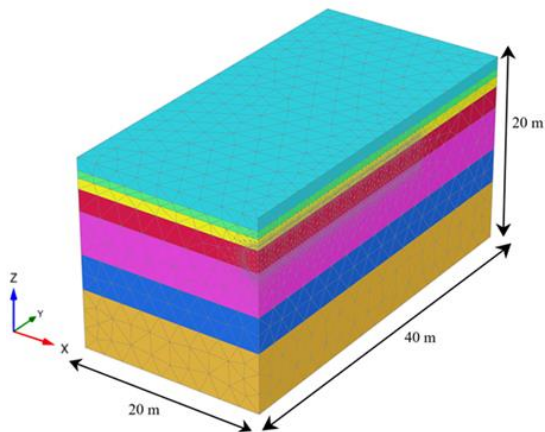
سیلت و خاک رس‌سیلتی قرار داشته و عمق سطح زمین تا مرکز خط لوله ۴۴۰۰ میلی‌متر است (Ma, 2021).

لوله از دستگاه جک تک قطبی، از نوع دیسک و متعادل با فشار زمین ساخته شده است. علاوه بر این در اطراف خط لوله، لوله‌های فاضلاب، آب و گاز وجود دارد. خط لوله بین



شکل ۱- خاک محیط و جهت پیشروی تونل (Ma, 2021)

شکل ۳، ابعاد مدل عددی شبیه سازی شده را نشان می‌دهد. بر اساس سیستم مختصات جهانی، مدل دارای ابعاد (۲۰ و ۴۰ و ۲۰) است.

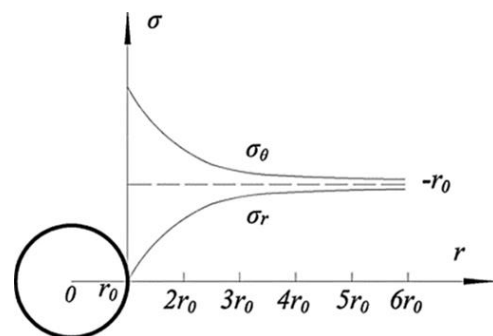


شکل ۳- ابعاد مدل عددی شبیه‌سازی شده

پارامترهای اندازه‌گیری شده در مطالعه موردی مطابق شکل ۴، می‌باشد. لازم به ذکر است خواص لایه‌های خاک بر اساس مدل رفتاری موهر کلمب آورده شده است.

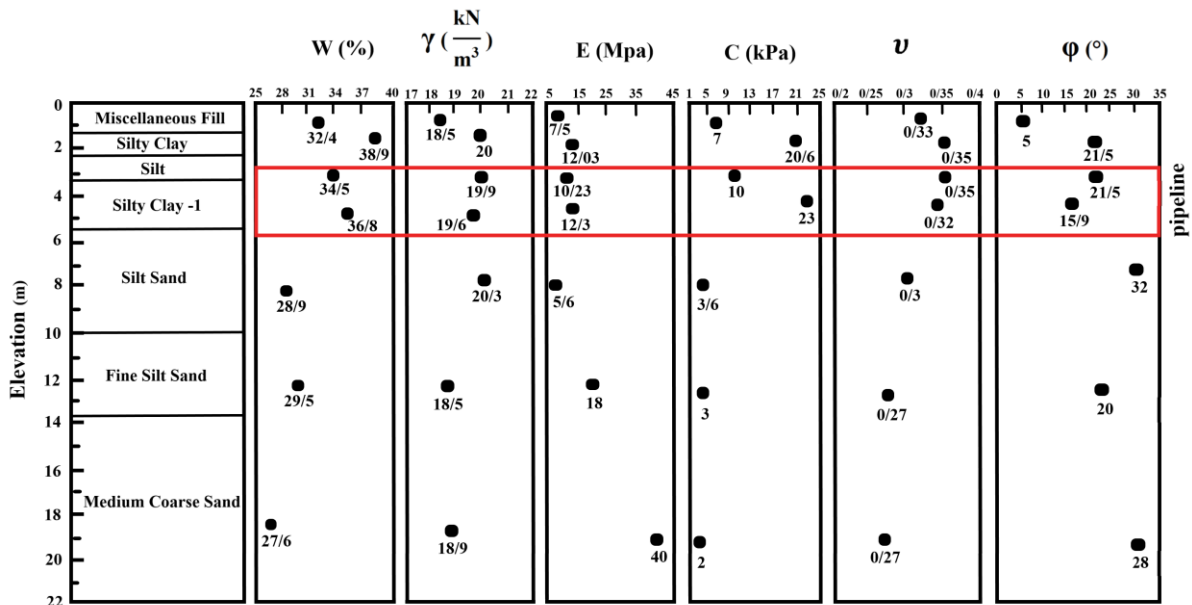
۲-۲- هندسه مدل عددی

مطابق شکل ۲، تنش اصلی شعاعی (σ_r) اطراف با افزایش فاصله از دیواره تونل افزایش می‌یابد و تنش اصلی مماسی (σ_θ) نیز با افزایش r به تدریج کاهش می‌یابد و به تنش طبیعی (σ_0) نزدیک می‌شود. به‌طور کلی تنش‌های σ_θ و σ_r در زمین اطراف ناشی از حفر تونل‌های زیرزمینی در فاصله $6r_0$ که در آن شعاع تونل است، برابر $2.8\% \sigma_0$ است. به عبارتی تنش‌های شعاعی و مماسی با تقریب خوبی با تنش‌های اولیه برابر می‌شود (Lv, 2020).



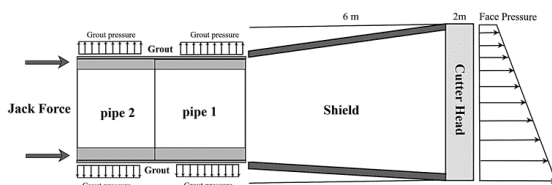
شکل ۲- توزیع تنش‌های اصلی در محیط اطراف تونل (Ma, 2021)

تأثیر مخروطی بودن سپر حفاری در جابجایی و بار وارد بر خط لوله در زمین‌های لایه‌ای رضا محمدپور و، ص ۲۷۱-۲۸۵



شکل ۴- پارامترهای فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک (Ma, 2021)

پس کاهش اصطکاک بین لوله و خاک اطراف از نقطه نظر اقتصادی و سرعت عملیات مسئله مهمی است. بنابراین جهت کم اثر کردن این پارامتر پشت لوله‌ها عملیات تزریق دوغاب (مخلوطی از بنتونیت، سیمان و آب) انجام می‌گیرد. با اعمال تزریق پیوسته دوغاب حتی تحت فشار کم، می‌توان بین لوله بتنی و خاک یک مرز ایجاد کرد. دوغاب بنتونیت قادر است ضریب اصطکاک بین لوله و خاک را به طور قابل توجهی کاهش دهد و تقریباً به ۱۰ درصد حالت اولیه برساند. اما اگر تزریق دوغاب بصورت پیوسته انجام نشود، در این صورت تأثیر بنتونیت در ضریب اصطکاک به ۵۰ درصد حالت اولیه کاهش می‌یابد (Namli, 2017).



شکل ۵- شماتیکی از سپر حفاری مخروطی و سایر پارامترها

در این مطالعه تزریق دوغاب بصورت پیوسته در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۶، با توجه به وزن لوله‌ها و

۲-۳- سپر حفاری مخروطی

سپر حفاری دارای طول ۸ متر است که ۲ متر ابتدایی آن شامل کله حفاری بوده و ۶ متر بقیه سپر می‌باشد. به منظور اعمال اجازة جابجایی اولیه و رهایی تنش سپر حفاری به صورت مخروطی شبیه سازی شد. کله حفاری به صورت کاملاً استوانه‌ای و سپر به صورت مخروطی است. سه حالت مختلف برای بررسی تأثیر نرخ کاهش قطر سپر در نشست سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱) نرخ کاهش قطر سپر ۰/۰۵ درصد به ازای هر متر است که در کل برای ۶ متر از سپر حفاری برابر ۰/۳ درصد خواهد شد (سپر A).

۲) نرخ کاهش قطر ۰/۱ درصد به ازای هر متر که برای ۶ متر از سپر برابر ۰/۶ درصد خواهد شد (سپر B).

۳) نرخ کاهش قطر ۰/۱۵ درصد به ازای هر متر که برای ۶ متر از سپر برابر ۰/۹ درصد خواهد شد (سپر C).

شکل ۵، شماتیکی از ماشین حفاری و فضای کاری را نشان می‌دهد.

۲-۴- فشار تزریق دوغاب

محدودیت اصلی روش لوله رانی فاصله رانش است که مستقیماً به اصطکاک بین لوله و خاک اطراف بستگی دارد.

بسته شد و مرزهای کناری نیز در جهت عمودی بسته شدند.

۲-۸- تحلیل حساسیت

حساسیت یک پارامتر را می‌توان با ضریب حساسیت (S_p) اندازه‌گیری کرد. در سیستمی که خصوصیات p توسط n پارامتر کنترل می‌شود، تابع حساسیت (S_k) که کمیتی بی‌بعد است به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Zhao, 2003).

$$S_k(\alpha_k) = \frac{\delta_p / \delta_{\alpha}}{\delta_{\alpha} / \delta_{\alpha_k}} = \frac{|\Delta P / P^*|}{|\Delta \alpha_k / \alpha_k^*|} = \frac{|\Delta P|}{|\Delta \alpha|} \frac{\alpha^*}{P^*} \quad (1)$$

در رابطه ۱ اگر مقدار کمیت δ_{α} دارای مقادیر کوچک باشد، رابطه $S_k(\alpha)$ می‌توان به صورت زیر لحاظ کرد (Zhao, 2003).

$$S_k(\alpha_k) = \left| \frac{d\varphi_k(\alpha_k)}{d\alpha_k} \right| \frac{\alpha_k}{P} \quad (2)$$

طبق رابطه ۳ با قرار دادن پارامتر α_k^* برابر α_k فاکتور حساسیت (S_k^*) پارامتر α_k به دست خواهد آمد (Zhao, 2003).

$$S_k^* = S_k(\alpha_k^*) = \frac{d\varphi_k(\alpha_k)}{d\alpha_k} \alpha_k = \alpha_k^* \frac{\alpha_k^*}{P^*} \quad (3)$$

۲-۹- اندرکنش

در حالت واقعی بین سپر حفاری و لوله‌ها با خاک اطراف اندرکنش وجود دارد. بنابراین در مدل عددی نیز این پارامتر تعریف شد. المان‌های اندرکنش اصولاً در نقاطی از خاک مورد نظر که سازه‌ای احداث شده باشد، مقاومت خاک و پارامترهای خاک از حالت بکر خارج شده و اصطلاحاً به حالت دست خورده وارد می‌شود. پارامترهای چسبندگی و اصطکاک در قسمت سطح تماس بصورت رابطه ۴ و ۵ تعریف می‌شود که در آن مقدار R برابر ۰٫۶۷ است (Manual plaxis 3D, 2020).

$$C_{new} = R \times C \quad (4)$$

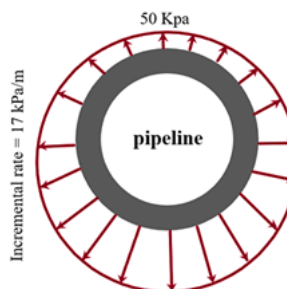
$$\tan \varphi_{new} = R \times \tan \varphi \quad (5)$$

۳- بحث و بررسی

۳-۱- کانتور سه بعدی جابجایی

شکل ۸، کانتور سه بعدی جابجایی عمودی برای سپر A

دوغاب می‌توان اظهار داشت که فشار در تاج و کف خط لوله یکسان نیست. تاج خط لوله تحت فشار تزریق ۵۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد که در راستای قطر از تاج لوله تا کف آن بصورت خطی با نرخ ۱۷ کیلوپاسکال به ازای هر متر افزایش می‌یابد. بنابراین تأثیر دانسیته دوغاب نیز لحاظ شد.



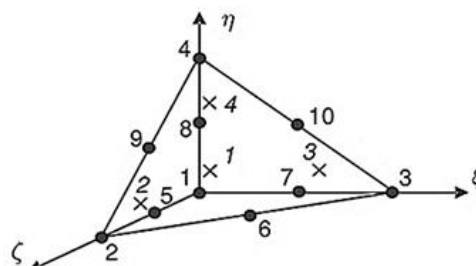
شکل ۶- فشار دوغاب بنتونیت در اطراف خط لوله

۲-۵- فشار سینه کار

فشار سینه کار نیز جهت متعادل شدن با فشار زمین و فشار آب با افزایش عمق قرارگیری افزایش می‌یابد. فشار صفحه حفاری ۱۱۶ کیلوپاسکال در نظر گرفته شد که بصورت خطی با نرخ ۱۵ کیلوپاسکال به ازای هر متر در راستای قطر افزایش می‌یابد.

۲-۶- المان بندی

مطابق شکل ۷، المان‌های اساسی خاک به صورت چهار وجهی و ۱۰ گرهی و برای صفحات و ژئوگریدها نیز المان‌های ۶ گره‌ای در نظر گرفته شد.



شکل ۷- المان ۴ وجهی ۱۰ گرهی در مش بندی خاک (Manual plaxis 3D, 2020)

۲-۷- شرایط مرزی مدل عددی

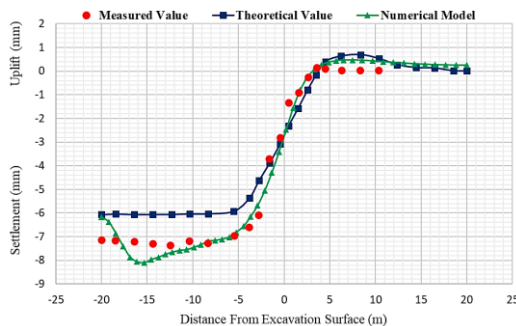
سطح مدل جهت بررسی نشست‌ها و برآمدگی‌ها بصورت کاملاً آزاد فرض شد. جابجایی‌ها در همه جهات در مرز پایین

۳-۲- نشست طولی و عرضی برای شرایط مختلف

سپر

مقایسه تغییر شکل سطحی زمین به صورت پروفیل طولی که شامل مقادیر نظری محاسبه شده، مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل عددی شبیه‌سازی شده می‌باشد در شکل ۱۰، آورده شده است (Ma, 2021).

موضوع حرکت سپر در خاک و جابجایی‌ها یک مسأله وابسته به زمان است. بنابراین در شرایط واقعی سرعت پیشروی ماشین و خط لوله در نرخ جابجایی مؤثر است. در روش عددی با تعریف گام‌های مجزا این مسأله در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰- مقایسه منحنی طولی نشست برای سه مطالعه انجام شده (Ma, 2021)

شکل ۱۱، جابجایی سطح زمین را برای سه حالت مخروطی متفاوت سپر نشان می‌دهد.

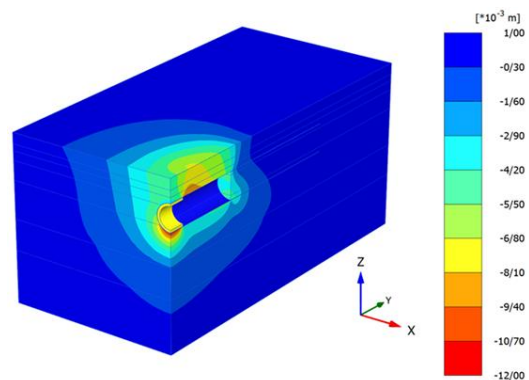
میزان پیشروی سپر در همه حالت‌ها ۲۶ متر بوده و مقطع عرضی نیز در قسمت انتهایی سپر حفاری با مقدار جابجایی‌های قابل توجه زده شده است.

شکل ۱۲، تأثیر سه سپر با درجه مخروطی متفاوت را در نشست سطح زمین را نشان می‌دهد. طبق مشاهدات درجه مخروطی بودن سپر حفاری با نشست سطحی رابطه مستقیم دارد. درجه مخروطی بودن سپر حفاری باید به گونه‌ای انتخاب شود که طبق مطالعات استانداردترین حالت ممکن باشد. بدین صورت که نه خیلی زیاد باشد که جابجایی به قسمت پلاستیک برسد و نه خیلی کم باشد که در این صورت خط لوله بار زیادی را تحمل خواهد کرد.

مخروطی در نظر گرفتن سپر حفاری با توجه به شکل ۱۲، تأثیر چشمگیری در جابجایی زمین دارد و بایستی قبل

(۰/۳ درصد) و در پیشروی ۱۰ متری خط لوله را نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت بیشترین جابجایی در انتهای سپر حفاری اتفاق می‌افتد. بدلیل اضافه حفاری که صورت می‌گیرد باعث همگرایی فضای حفاری می‌شود. بدین ترتیب بیشترین مقدار همگرایی در قسمتی از خط لوله اتفاق می‌افتد که مقدار بیشینه فضا برای همگرایی وجود داشته باشد.

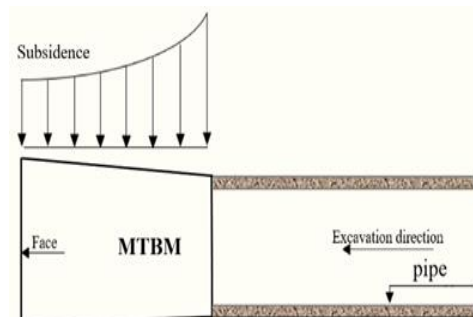
بنابراین انتهای سپر حفاری دارای بیشترین جابجایی خواهد بود. از طرفی چون اجازه رهایی تنش به محیط داده شده پس تنش وارده به خط لوله کاهش چشمگیری خواهد داشت که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.



شکل ۸- کانتور سه بعدی جابجایی عمودی

همان‌طور که در شکل ۹، مشاهده می‌شود انتهای سپر حفاری کاهش قطر به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

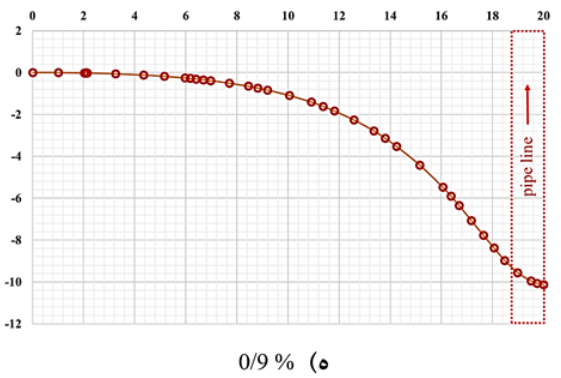
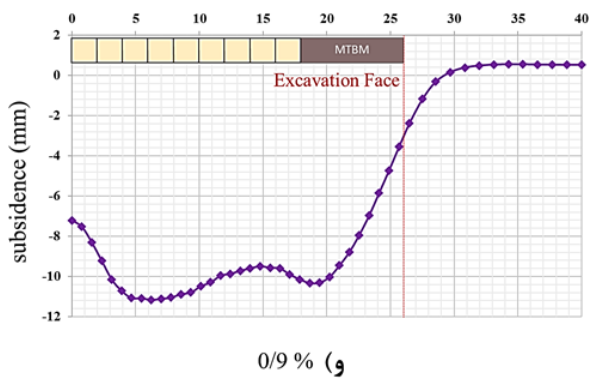
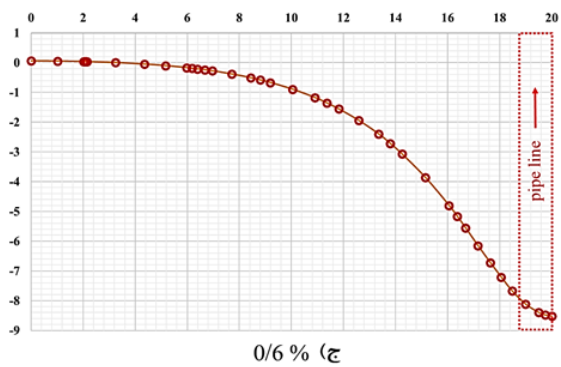
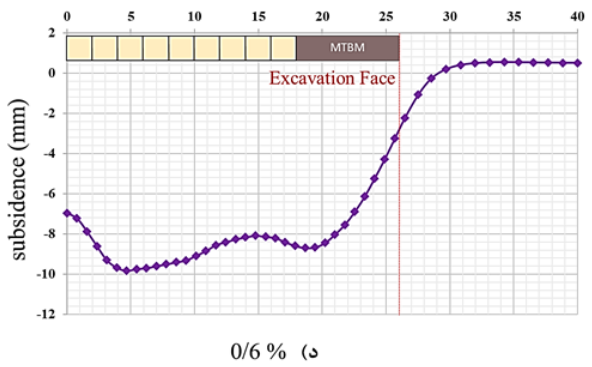
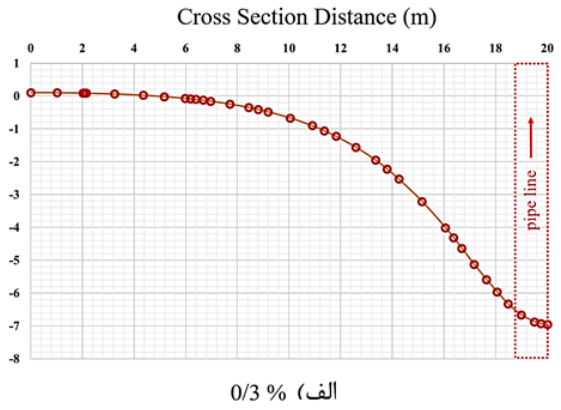
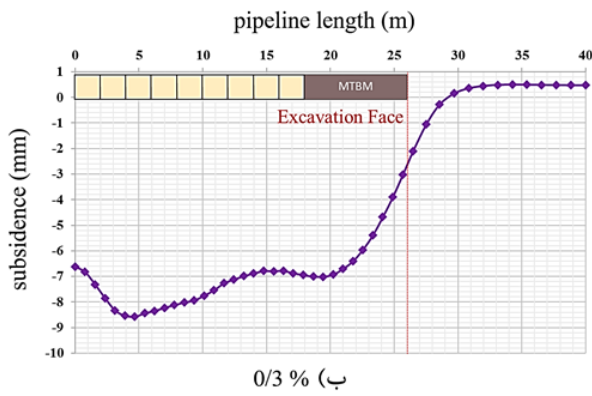
به عبارت بهتر در انتهای سپر حفاری بیشترین حالت برای آزاد شدن تنش اولیه به مدل داده شده است. بنابراین بیشترین جابجایی را شامل خواهد شد.



شکل ۹- مقدار جابجایی سطح زمین در طول خط لوله

سطح و شاخص حساسیت پرداخته خواهد شد.

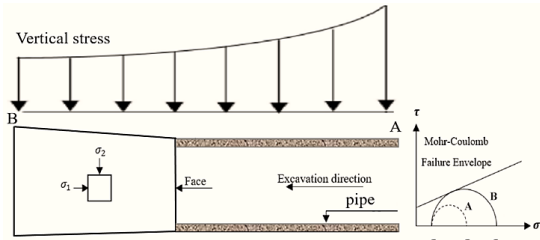
از انجام عملیات مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و مقدار بهینه آن انتخاب شود. در ادامه به بررسی جزئی تر نشست



شکل ۱۱- جابجایی سطح زمین برای شرایط مختلف درصد کاهش قطر سپر حفاری
الف و ب) ۰٫۳ درصد، ج و د) ۰٫۶ درصد، ه و و) ۰٫۹ درصد

تأثیر مخروطی بودن سپر حفاری در جابجایی و بار وارد بر خط لوله در زمین‌های لایه‌ای ...، رضا محمدپور و ...، ص ۲۷۱-۲۸۵

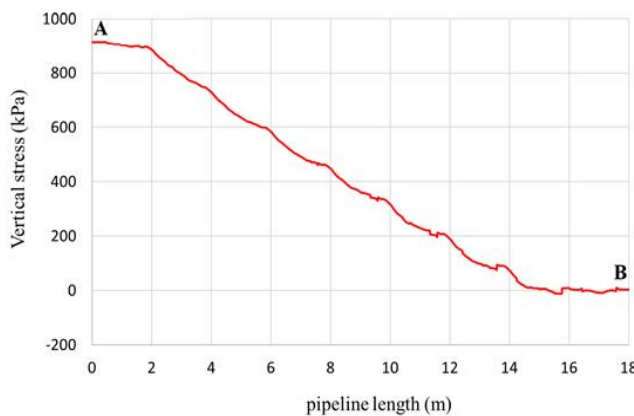
سپر A آورده شده است. در این شرایط بیشترین تنش وارد برابری $917,5$ کیلوپاسکال می‌باشد. برای سپر C نیز بیشترین تنش عمودی وارده بر خط لوله برابر $2,193$ مگاپاسکال می‌شود. یعنی تقریباً دو برابر حالت اول شده است.



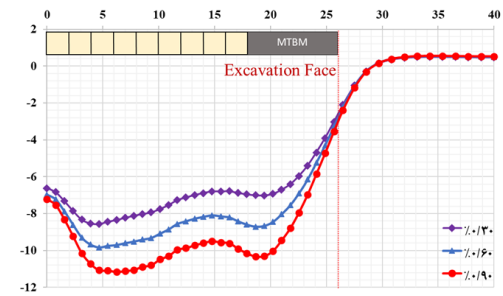
شکل ۱۳- بار وارده به خط لوله و پوش شکست موهر کلمب در ابتدا و انتهای خط لوله

نقطه B به دلیل اجازه رهایی تنش، بار زیادی بر خط لوله وارد نمی‌کند. اما رفته رفته تنش‌های عمودی بیشتر شده و در نقطه A یعنی ابتدای خط لوله به مقدار بیشینه می‌رسد.

در مدل عددی شبیه‌سازی شده کلاً ۸ گام حفاری ۲ متری تعریف شده که در کل ۱۶ متر عملیات حفاری و رانش در مدل خواهیم داشت.



Max Stress = 917,5 kPa



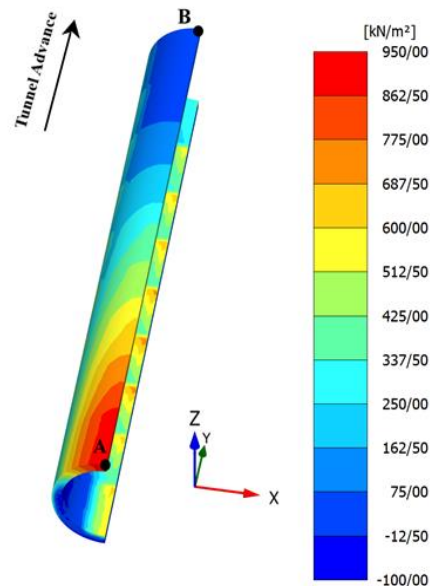
شکل ۱۲- مقایسه نشست سطحی زمین برای سه حالت متفاوت سپر حفاری مخروطی

۳-۳- تنش وارده بر خط لوله در شرایط متفاوت

در شکل ۱۳، بار وارد شده به خط لوله و همچنین پوش شکست در ابتدا و انتهای خط لوله بصورت شماتیک آورده شده است.

طبق مشاهدات از نقطه B تا A یعنی هر چقدر به ابتدای خط لوله نزدیک می‌شویم مقدار تنش وارد شده به خط لوله افزایش می‌یابد. در این میان مخروطی لحاظ کردن سپر حفاری باعث افزایش نشست و کاهش بار وارده بر خط لوله می‌شود.

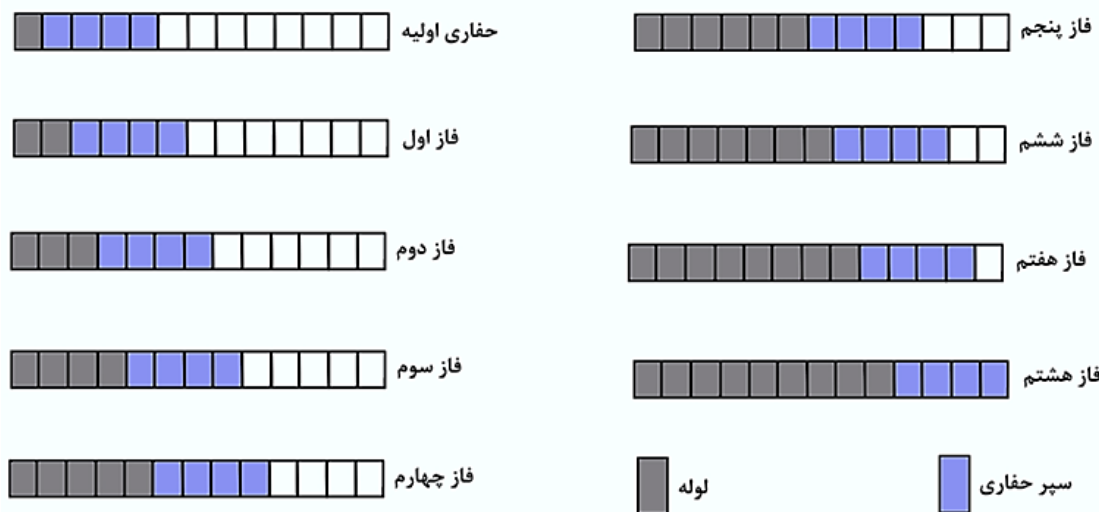
در شکل ۱۴، نیز تنش عمودی وارده بر خط لوله برای



شکل ۱۴- تنش عمودی وارده بر خط لوله برای سپر A

نظر گرفته شده است. گام‌های حفاری بصورت شکل ۱۵، در نظر گرفته شد.

در لوله‌رانی عملیات حفاری، رانش لوله‌ها و تزریق دوغاب به‌صورت همزمان انجام می‌گیرد بنابراین در مدل عددی شبیه‌سازی شده نیز این فاکتورها به‌صورت همزمان در



شکل ۱۵- موقعیت سپر و لوله‌ها در فازهای حفاری

حفاری مخروطی A و B و C در رابطه ۶ و ۷ و ۸ آورده شده است.

۳-۴- رابطه LDP برای شرایط مختلف

رابطه نشست سطح زمین در طول خط لوله برای سپر

$$y = 4 \times 10^{-7} X^6 - 5 \times 10^{-5} X^5 + 0/002 X^4 - 0/05 X^3 + 0/47 X^2 - 1/96 X - 5/8 \quad (۶)$$

$$y = 5 \times 10^{-7} X^6 - 6 \times 10^{-5} X^5 + 0/003 X^4 - 0/06 X^3 + 0/6 X^2 - 2/5 X - 6 \quad (۷)$$

$$y = 5 \times 10^{-7} X^6 - 7 \times 10^{-5} X^5 + 0/0031 X^4 - 0/064 X^3 + 0/66 X^2 - 3 X - 5/9 \quad (۸)$$

حفاری روند افزایشی دارد و این مسئله می‌تواند در خطوط لوله طولانی مشکل‌ساز باشد. به‌علاوه بار وارده بر خط لوله نیز چند برابر خواهد شد.

۳-۶- تحلیل حساسیت

شکل ۱۷، رابطه‌ی بین میزان کاهش قطر سپر حفاری و نشست سطح زمین را نشان می‌دهد. این رابطه تقریباً بصورت خطی است.

بنابراین رابطه بین میزان کاهش قطر سپر (D) با نشست سطح زمین (U) بصورت زیر می‌باشد.

$$U = 0/128 D + 7/48 \quad (۹)$$

۳-۵- سپر حفاری کاملاً استوانه‌ای

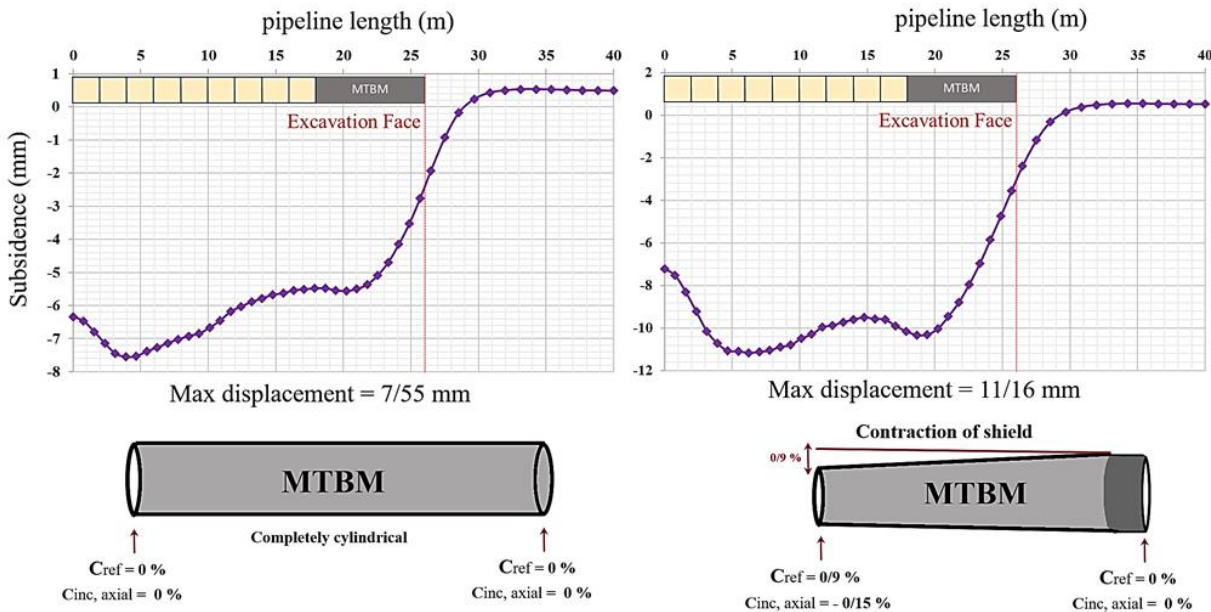
در شکل ۱۶، مقادیر نشست طولی در سطح زمین برای حالت کاملاً استوانه‌ای سپر حفاری و حالت مخروطی C مورد مقایسه قرار گرفته است.

بیشترین جابجایی عمودی در سطح زمین برای حالت استوانه‌ای سپر برابر ۷/۵۵ میلی‌متر و برای حالت مخروطی برابر ۱۱/۱۶ میلی‌متر می‌باشد.

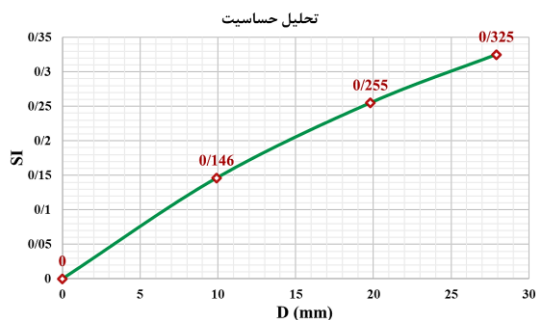
در حالت مخروطی بدلیل اینکه اجازه جابجایی اولیه و رهایی تنش داده شده بنابراین جابجایی‌ها بعد از عبور سپر روند افزایش قابل توجهی نخواهد داشت.

اما در حالت استوانه‌ای جابجایی پس از عبور سپر

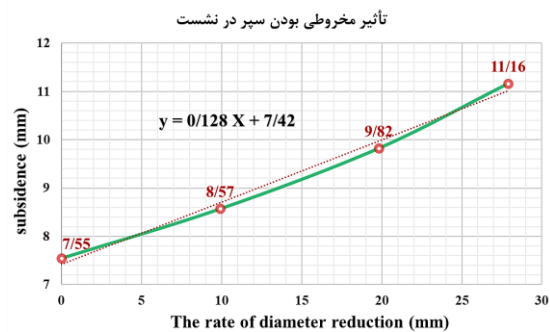
تأثیر مخروطی بودن سپر حفاری در جابجایی و بار وارد بر خط لوله در زمین‌های لایه‌ای رضا محمدپور و ص ۲۷۱-۲۸۵



شکل ۱۶- مقایسه نشست سطح زمین برای دو حالت استوانه‌ای و مخروطی سپر حفاری



شکل ۱۸- نمودار تغییرات تابع حساسیت با مقادیر کاهش قطر سپر



شکل ۱۷- رابطه بین میزان کاهش قطر سپر با نشست سطح زمین

به همین ترتیب برای قطر فضای حفاری و عمق قرارگیری خط لوله نیز تحلیل حساسیت صورت گرفت. فاکتور حساسیت با قرار دادن مقدار پایه و اولیه در تابع حساسیت بدست می‌آید و برای مدل عددی شبیه سازی شده حالت پایه سپر مخروطی ۰/۳٪ می‌باشد. لازم به ذکر است هر چقدر فاکتور حساسیت دارای کمیت بزرگی باشد پارامتر بررسی شده دارای اهمیت بیشتری خواهد بود. در جدول ۱، مقادیر فاکتور حساسیت (S) آورده شده است.

تابع حساسیت پارامتر مخروطی بودن سپر حفاری بصورت رابطه ۱۰ خواهد بود. با قرار دادن میزان تغییرات قطر سپر حفاری در رابطه ۱۰، نمودار تابع حساسیت (D - SI) مطابق شکل ۱۸، بدست خواهد آمد.

$$SI_D = \left| \frac{du}{dD} \right| \frac{D}{u} = \frac{|0/128| \times D}{U} = \frac{0/128 D}{0/128 D + 7/42} \quad (10)$$

حفاری شده < عمق قراگیری خط لوله < مخروطی بودن سپر حفاری) می‌باشد.

میزان تغییر قطر که فرض شده بایستی با در نظر گرفتن شرایط ساخت، بصورت اجرایی و عملی باشد. همچنین مخروطی کردن و کاهش بار و تنش روی لوله باعث افزایش نشست شده و در پروژه‌هایی که میزان نشست ایجاد مشکل نمی‌کند قابل توصیه است.

۵- سیاهه نمادها

تمامی نمادهای مورد استفاده در متن، جداول و گزاره‌های ریاضی در جدول ۲، آورده شده است.

جدول ۲- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
σ_r	Pa	تنش شعاعی
σ_θ	Pa	تنش مماسی
C	Pa	چسبندگی
φ	°	زاویه اصطکاک داخلی
ν	-	ضریب پواسون
E	Pa	مدول کشسان
γ	kN/m ³	وزن مخصوص
U	Mm	نشست سطح زمین
SI	-	تابع حساسیت
S	-	فاکتور حساسیت

جدول ۱- فاکتور حساسیت پارامترهای بررسی شده

فاکتور حساسیت (S)	پارامتر بررسی شده
۰٫۱۴۶	مخروطی بودن سپر حفاری
۱٫۲	قطر فضای حفاری
۰٫۴۷	عمق قرارگیری خط لوله

قطر فضای حفاری شده دارای اهمیت بیش‌تری نسبت به سایر پارامترها است. بنابراین در مطالعات اولیه بایستی دقت و صحت بیش‌تری جهت برآورد آن به کار برده شود.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه به تجزیه و تحلیل تأثیر سپر حفاری مخروطی در جابجایی و تنش وارده بر خط لوله و همچنین تحلیل حساسیت آن با استفاده از روش المان محدود پرداخته شد. در این بررسی مشخص شد که با افزایش درصد مخروطی سپر حفاری، نشست در سطح زمین بصورت خطی افزایش می‌یابد. تنش وارده بر خط لوله نیز در شرایط ۰٫۳ و ۰٫۹ درصد بررسی شده و معلوم شد که مخروطی بودن سپر باعث جابجایی اولیه و کشسان خاک شده و با رهایی تنش در نهایت پس از عبور سپر تنش قابل توجهی بر خط لوله وارد نخواهد شد. در حالت استوانه سپر حفاری جابجایی‌ها بعد از گذر سپر حفاری روند افزایشی قابل توجهی دارد که در حالت مخروطی اینطور نیست. در نهایت تحلیل حساسیت چند پارامتر ارزیابی شد و فاکتور حساسیت آن‌ها مورد محاسبه قرار گرفت که اهمیت پارامترها بصورت (قطر فضای

۶- منابع

- Barbera, L. I. (1993). *Historical Development of Trenchless Construction Methods and Equipment in the United States*. In *Proceedings of Trenchless Technology Advanced Technical Seminar*, Trenchless Technology Center, Vicksburg, MS.
- Bergeson, W. (2014). *Review of long drive microtunneling technology for use on large scale projects*. *Tunnelling and underground space technology*, 39, 66-72.
- Chen, Y. Z. (2019). *A CEL study of bearing capacity and failure mechanism of strip footing resting on c-φ soils*. *Computers and Geotechnics*, 111, 126-136.
- Cheng, Y. S. (2019). *Attenuation characteristics of stress wave peak in sandstone subjected to different axial stresses*. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Dias, D. K. (2000). *Three dimensional simulation of slurry shield tunnelling*. In *Geotechnical aspects of*

- underground construction on soft ground* , (pp. 351-356).
- FSTT, F. (2006). *Microtunneling and Horizontal Drilling*.
- Gholamreza Zadeh, V., Taheri, E. (2022). Numerical modeling of crack pipe splitting operations in sand and clay. *Tunnel and Underground Engineering*, (10), 1-2
- Ji, X. Z. (2019). A method to estimate the jacking force for pipe jacking in sandy soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, 119-130.
- Jia, P. J. (2019). Calculating jacking forces for circular pipes with welding flange slabs from a combined theory and case study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(4), 1586-1599.
- Lv, J. L. (2020). Numerical simulations of construction of shield tunnel with small clearance to adjacent tunnel without and with isolation pile reinforcement. . *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(1), 295-309.
- Ma, W. W. (2021). Soil Layer Disturbance Caused by Pipe Jacking: Measurement and Simulation of a Case Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(4), 1467-1478.
- Manual plaxis 3D* . (2020).
- Mollon, G. D. (2013). Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements. *Acta Geotechnica*, 181-199.
- Namli, M. &. (2017). Effect of bentonite slurry pressure on interface friction of pipe jacking. . *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 8(2), 04016016.
- Ni, P. M. (2018). Fragility analysis of continuous pipelines subjected to transverse permanent ground deformation. *Soils and Foundations*, 58(6), 1400-1413.
- Niu, Z. C. (2020). A new method for predicting ground settlement induced by pipe jacking construction. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks*. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V.
- Song, Z. C. (2020). Mechanical properties of limestone from Maixi tunnel under hydro-mechanical coupling. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-13.
- Song, Z. M. (2019). Optimization analysis of controlled blasting for passing through houses at close range in super-large section tunnels. *Shock and Vibration*.
- Song, Z. P. (2018). Determination of equivalent blasting load considering millisecond delay effect. *Geomechanics & engineering*, 15(2), 745-754.
- Song, Z. S. (2019). Research on management and application of tunnel engineering based on BIM technology. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(8), 785-797.
- Song, Z. S. (2020). Study of the stability of tunnel construction based on double-heading advance construction method. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(1), 1687814019896964.
- Thomson, J. (2009). *Microtunnelling and How We Got There Trenchless International*.

- Tian, X. S. (2019). *Study on the propagation law of tunnel blasting vibration in stratum and blasting vibration reduction technology*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126, 105813.
- Wang, J. Z. (2020). *Creep properties and damage constitutive model of salt rock under uniaxial compression*. *International Journal of Damage Mechanics*, 29(6), 902-922.
- Wu, H. Y. (2020). *Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering*. *Materials*, 13(7), 1774.
- Yin, C. (2020). *Hazard assessment and regionalization of highway flood disasters in China*. *Natural Hazards*, 100(2), 535-550.
- Zhang, K. C. (2019). *Numerical analysis of pipelines settlement induced by tunneling*. *Advances in Civil Engineering*.
- Zhang, Y. W. (2019). *Modeling of loess soaking induced impacts on a metro tunnel using a water soaking system in centrifuge*. *Geofluids*.
- Zhao, J. &. (2003). *Stability analysis and modelling of underground excavations in fractured rocks*.

Effect of excavation shield conicality on the displacement and stress of the pipeline in layered areas during pipe jacking operations

R. Mohammadpour¹; E. Taheri^{2*}

1- Master student of Rock mechanics; Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University,
R.mohammadpour@modares.ac.ir

2- Assistant Professor of Engineering Faculty; Tarbiat Modares University, _taheri@modares.ac.ir

Received: 6 Feb 2022; Accepted: 7 Apr 2022
DOI: 10.22044/TUSE.2022.11623.1446

Keywords

Pipe jacking
Cone excavation shield
Ground displacement
Layered ground
Finite element method
Sensitivity analysis

Extended Abstract

Summary

Recently, most underground structures are mechanized using excavation shields. Moreover, one of the major challenges in underground structures is the ground deformation. Thus, the analysis of this mechanism is necessary for safety purposes and project design. One of the effective parameters in the ground displacement is the geometry of the excavation shield. Since pipes are connected to the excavation shield, the initial stress relaxation and displacement are not allowed. In this regard, using a cone excavation shield can solve this problem. In this research, the effect of excavation shield conicality on the ground is investigated. The Plaxis finite element software is used for numerical modeling. Moreover, the results are validated with the field data and analytical analysis. Furthermore, the effect of stress on the pipeline is also investigated in this research. Finally, it is found that the relationship between conical excavation shield and ground surface displacement is linear. The load on the pipeline becomes almost doubles with increasing the percentage of conicality of the shield from 0.3% to 0.9%. The main purpose of this study is to investigate the effect of the percentage of conical excavation shield on the ground movement and the induced load on the pipeline. In addition, determination of the relationship between the conicality of the shield and the subsidence of the ground and sensitivity analysis are the other purposes that can be mentioned for this study. One of the most important applications of this research is the possibility of controlling the ground movement with respect to the effective parameters.

Introduction

In microtunneling the segments that are in the form of pipes are connected to the end of the excavation shield and the thrust force is provided by hydraulic jacks in the transmission shaft. Therefore, it is impossible to allow stress relief and over-cut in microtunneling. The only solution can be designing the excavation shield in a conical shape and considering the related over-cut. Therefore, the initial displacement will be allowed and the stresses on the pipeline will be less than the maximum value.

Methodology and Approaches

In this descriptive-interventional study, based on the finite element numerical simulation and using the PLAXIS 3D software, the ground deformation pattern is studied and analyzed. Three following different modes have been considered to investigate the effect of the shield diameter reduction rate on the ground subsidence: 1) The reduction rate of the shield diameter is 0.05 percent per meter, which in total will be equal to 0.3 percent for 6 meters of the shield. 2) Diameter reduction rate of 0.1 percent per meter, which will be equal to 0.6 percent for 6 meters of the shield. 3) Diameter reduction rate of 0.15 percent per meter, which will be equal to 0.9 percent for 6 meters of the shield.

Results and Conclusions

In this study, it is found that with increasing the percentage of conicality of the excavation shield, subsidence at the ground surface increases linearly. The stress on the pipeline is investigated in the conditions of the percentage of conicality of the shield equal to 0.3% and 0.9% and it is found that the conical nature of the shield causes the initial and elastic displacement of the soil and the stress relief. In the cylindrical state of the excavation shield, the displacements have a significant upward trend after the passage of the excavation shield that is not the case in the conical state. Finally, the sensitivity analysis of several parameters is made and their sensitivity factor is calculated. As a result of this sensitivity analysis, the studied parameters in the order of their degrees of importance are diameter of excavation space, depth of the pipeline, and finally, conical shield.
