



مقاله پژوهشی

مطالعه عددی تأثیر پارامترهای اساسی در نشست سطح زمین طی عملیات لوله‌رانی

رضا محمد پورا، احسان طاهری^{۱*}

۱- گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: بهمن ۱۴۰۰، پذیرش: شهریور ۱۴۰۱)

چکیده

تکنیک لوله‌رانی یک راه‌کار علمی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای ساخت تأسیسات زیرزمینی به شمار می‌رود که نقش اساسی در اجرای پروژه‌ها دارد. در این روش هم‌زمان با انجام عملیات حفاری توسط سپر، رانش لوله‌ها با استفاده از جک‌های هیدرولیکی صورت می‌پذیرد. تغییر شکل زمین در طول عملیات لوله‌رانی از اساسی‌ترین چالش‌هایی است که تحلیل آن برای اهداف ایمنی و طراحی پروژه امری لازم و ضروری است. پارامترهای متعددی وجود دارد که در الگوی تغییر شکل زمین طی عملیات لوله‌رانی تأثیر می‌گذارد. تأثیر هر یک از پارامترها و میزان حساسیت آن‌ها بایستی مشخص گردد تا با طراحی مناسب بتوان تغییر شکل زمین را کنترل کرد. بررسی الگوی جابجایی در زمین لایه‌ای و بر اساس شبیه‌سازی عددی اجزاء محدود و در نهایت تحلیل حساسیت آن‌ها موضوعی است که مطالعات محدودی در این زمینه انجام شده است. در این مطالعه، جزئیات مدل‌سازی از جمله مخروطی بودن سپر حفاری، راندمان افزایشی فشار تزریق دوغاب و فشار صفحه حفاری در نظر گرفته شده است تا نزدیک به حالت واقعی بوده باشد. مقادیر جابجایی در سطح زمین و تاج خط لوله مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار عددی اجزاء محدود پلکسیس و با در نظر گرفتن مطالعه موردی انجام گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج به‌دست آمده از مطالعات میدانی و تحلیلی کالیبره شده و در ادامه تأثیر هر یک از پارامترها در الگوی تغییر شکل زمین و نیز تخمین میزان برآمدگی‌ها و محل دقیق آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در گام بعد رابطه هر یک از پارامترها با نشست سطح زمین برآورد شده و در نهایت تأثیر هر یک از عوامل مختلف با استفاده از تحلیل حساسیت سنجیده شد و شاخص حساسیت هر کدام مشخص گردید. نتایج نشان می‌دهد حساس‌ترین عامل نسبت به نشست سطح زمین قطر فضای حفاری و کم‌اهمیت‌ترین عامل فشار صفحه حفاری است. بیشترین نشست در قسمت انتهایی سپر حفاری به دلیل مخروطی بودن سپر و اجازه ترخیص تنش اتفاق می‌افتد. در نهایت با توجه به نتایج مشخص گردید که رابطه بین زاویه اصطکاک داخلی و مدول کشسان با نشست سطح زمین به صورت خطی اما غیرمستقیم است. روابط سایر پارامترها نیز به صورت غیر خطی ارزیابی شد.

کلمات کلیدی

لوله‌رانی، مدل‌سازی عددی، تغییر شکل زمین، تحلیل حساسیت

*عهده‌دار مکاتبات: e_taheri@modares.ac.ir

۱- مقدمه

با افزایش چشم‌گیر سرعت شهرنشینی، تقاضا برای روش‌های نوین بدون ترانسه به‌سرعت افزایش یافته است که نقش مهمی در توسعه حمل و نقل شهری ایفا می‌کند [۱،۲]. یکی از مهم‌ترین شرایط، کنترل همگرایی زمین در محیط شهری است [۳]. موضوع نشست ناشی از تونل‌سازی در مناطق شهری با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی و جنس زمین بسیار بحرانی است [۴]. به کارگیری مدل مناسب برای بررسی جابجایی، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهد [۵].

تکنولوژی‌های بدون ترانسه از نقطه‌نظر مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و ایمنی، بهترین روش برای نصب تأسیسات زیرزمینی شناخته می‌شوند [۶،۷].

تکنیک لوله‌رانی، یک روش حفاری بدون ترانسه است که برای نصب تأسیسات زیرزمینی از جمله خطوط لوله آب، فاضلاب، برق و شبکه‌های گاز با استفاده از جک‌های هیدرولیکی کاربرد دارد. به عبارتی این روش برای نصب خطوط لوله‌های طولانی مناسب است [۸،۹]. به‌علاوه لوله‌رانی بهترین گزینه برای نصب خطوط لوله زیرزمینی است زمانی که موانعی مانند بزرگراه، راه‌آهن، رودخانه، کانال‌ها و ساختمان‌ها در مسیر اجرای پروژه باشد [۱۰]. در حالت کلی تکنیک لوله‌رانی بدین‌صورت است که هم‌زمان با عملیات حفاری توسط دستگاه مکانیزه، رانش لوله‌ها نیز توسط جک‌های هیدرولیکی صورت می‌پذیرد [۱۱]. پارامترهای زیادی وجود دارد که می‌تواند در الگوی جابجایی زمین در طول عملیات لوله‌رانی تأثیر بگذارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به فشار صفحه حفاری، فشار تزریق دوغاب، قطر فضای حفاری، مقدار روباره و از پارامترهای ژئوتکنیکی نیز می‌توان به مدول کشسان، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی اشاره کرد. تغییر هرکدام از پارامترها با توجه به میزان حساسیت منجر به جابجایی می‌شود. بنابراین تخمین جابجایی زمین و آنالیز حساسیت هرکدام از پارامترها از اهمیت بسزایی در ساخت مهندسی لوله‌رانی برخوردار است و برای اهداف ایمنی و برنامه‌ریزی نیز امری لازم و ضروری است [۱۲]. این مطالعه، بر اساس شبیه‌سازی عددی اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس، الگوی جابجایی زمین را مورد تحلیل قرار داده و نتایج حاصل را با نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات میدانی و

تحلیلی مورد مقایسه می‌دهد تا صحت مدل‌سازی تأیید شود. در نهایت تأثیر هر یک از عوامل مختلف با استفاده از آنالیز حساسیت سنجدیده شده و شاخص حساسیت هرکدام از پارامترها از حساس‌ترین عامل تا کم‌اهمیت‌ترین عامل در جابجایی زمین ارزیابی می‌شود. علاوه بر این تأثیر ترکیبی چند پارامتر به‌صورت هم‌زمان در جابجایی زمین و درصد حساسیت سطح زمین و تاج خط لوله نسبت به تغییرات پارامترها بررسی خواهد شد. در این مقاله شبیه‌سازی بر اساس مطالعات میدانی ونجی‌ما و همکاران انجام گرفته است. آن‌ها مکانیزم اغتشاش و الگوی تغییر شکل خاک را با استفاده از تئوری محیط تصادفی مورد مطالعه قرار دادند [۱۳].

تعدادی مطالعات میدانی، تحلیلی و عددی در این زمینه ارائه شده است. شرل در سال ۱۹۷۷ روشی را برای پیش‌بینی حرکت سطح زمین در طی عملیات لوله‌رانی ارائه داد. وی بعد از انجام مطالعات نتیجه گرفت که حرکت خاک و تغییر شکل سطح، عمدتاً ناشی از نیروی رانش در هد ماشین حفاری و برش زیاد خاک است [۱۴]. ستین در سال ۲۰۰۵ طی مطالعه‌ای به این نتیجه رسید که اگرچه در حین عملیات حفاری دوغاب تزریق می‌شود اما بازهم تخریب خاک را خواهیم داشت؛ بنابراین ممکن است خاک اطراف لوله فروریخته و منجر به حرکت زمین و تغییر شکل سطح شود. نشست معمولاً به دلیل فروریختن خاک‌های اطراف در فضای حلقوی، ناشی از شل شدن خاک اطراف در بالای لوله رانش اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است این مطالعه بر روی تزریق دوغاب متمرکز بوده و فقط معایبی که تزریق دوغاب در پی دارد را دنبال کرده است [۱۵]. چنگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از مدل‌سازی عددی به بررسی چهار پارامتر اساسی تخریب خاک، فشار دوغاب تزریق‌شده، اصطکاک بین لوله و خاک و نیروی رانش در هد ماشین حفاری، مؤثر در حرکت زمین طی عملیات لوله‌رانی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که حرکت سطح زمین در راستای طولی خط لوله یکنواخت نیست. در قسمت پشت صفحه حفاری، با افزایش فاصله بین نقطه نظارتی و صفحه حفاری، نشست افزایش می‌یابد و نشست در نزدیکی صفحه حفاری کاهش می‌یابد. محدودیت مطالعه چنگ و همکاران، پارامترهای بررسی‌شده است. به عبارتی آن‌ها پارامترهایی که اهمیت و تأثیرپذیری بیشتری دارند (از جمله قطر فضای حفاری و عمق

دسته‌بندی کردند و با جزئیات مورد تحلیل قرار دادند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که دامنه اغتشاش خاک نیز در قسمت عرضی خط لوله بزرگ‌تر از قسمت بالای خط لوله است. نتایج نشان داد که هرچه به محور خط لوله نزدیک شویم اضافه تنش بیشتر خواهد بود، سرعت میرایی سریع‌تر است و دامنه تأثیر نیز کمتر است. توزیع محل نشست عرضی سطح به صورت نرمال است، دامنه اصلی نفوذ حدود $4D \pm$ و عرض فرونشست زمین حدود 10D است و حداکثر نشست مستقیماً بالای محور خط لوله رخ می‌دهد. خاک جلوی دستگاه حفاری عمدتاً تحت نیروی مثبت رانش قرار می‌گیرد، بنابراین مقدار مشخصی برآمدگی اتفاق خواهد افتاد. برآمدگی در مقابل دستگاه حفاری رخ می‌دهد و سپس به تدریج کاهش می‌یابد [۱۳].

مقالات بررسی‌شده تأثیر پارامترها در جابجایی زمین را صرفاً با مقادیر جابجا شده بررسی کرده‌اند و به بررسی حساسیت و اهمیت آن‌ها و ارائه شاخص حساسیت هر یک از پارامترها پرداخته‌اند. علاوه بر این جزئیاتی از جمله (اضافه حفاری از طریق مخروطی در نظر گرفتن سپر حفاری، نرخ افزایش فشار تزریق دوغاب پشت لوله‌ها با در نظر گرفتن وزن مخصوص دوغاب و وزن لوله‌ها، تجزیه و تحلیل میزان جابجایی‌ها در سطح زمین و تاج خط لوله و مقایسه آن‌ها و همچنین تأثیر هم‌زمان چند پارامتر در نشست زمین و تأثیرات آن‌ها در جابجایی‌ها در سطح زمین و تاج خط لوله) مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است. این مطالعه با در نظر داشتن جزئیات سعی داشته عملیات لوله رانی را تا حد ممکن مطابق با شرایط واقعی شبیه‌سازی کند. شاخص حساسیت هر یک از پارامترها و میزان اهمیت آن‌ها نیز مشخص شده تا پارامترهای حساس با دقت و صحت بیشتری در مطالعات اولیه برآورد شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه میدانی

ونجی‌ما و همکارانش در سال ۲۰۲۱ به تجزیه و تحلیل الگوی تغییر شکل خاک ناشی از عملیات لوله‌رانی مربوط به مطالعه موردی خط لوله انتقال برق در چین پرداختند. در این پروژه، هفت لایه خاک وجود دارد که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است. جک لوله از دستگاه جک تک‌قطبی، از نوع دیسک و متعادل با فشار زمین ساخته

قرارگیری) مورد تجزیه و تحلیل قرار ندادند [۸]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس توسعه دادند. در این مطالعه، تأثیر پارامترهایی مثل مدول کشسان خاک، میزان آزادسازی تنش برجا، ضرایب فشار جانبی، مدول کشسان خط لوله و عمق مدفون در میزان جابجایی زمین مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اثرات حفاری تونل در جابجایی خط لوله را نیز تحلیل کردند و رابطه‌ای بین هر یک از پارامترها و نشست سطح ارائه دادند. در نهایت، رابطه‌ای بین حداکثر نشست سطح و تغییر شکل خطوط لوله برای سختی نسبی مختلف لوله و خاک پیشنهاد شد. نتایجی که این تجزیه و تحلیل در برداشت ترتیب همبستگی پارامترها بود که به صورت $E_p > K_0 > H > P > E_s$ ارائه گردید؛ بنابراین مدول کشسان خاک بیشترین حساسیت را در نشست خط لوله دارد و نرخ آزادسازی تنش بعد از آن بیشترین تأثیر را در این زمینه خواهد داشت. مدول کشسان لوله نیز کمترین تأثیر را در نشست خط لوله دارد. البته این مطالعه نیز پارامترهای اساسی مؤثر در جابجایی مثل قطر فضای حفاری و نیروی رانش را مورد بررسی و تحلیل قرار ندادند. همچنین لازم به ذکر است جزئیاتی از جمله اضافه حفاری و اجازه رهایی تنش مجاز و همچنین فشار تزریق دوغاب پشت لوله‌ها و نرخ افزایشی آن در راستای قطر که از مؤثرترین پارامترها است، لحاظ نشده است [۱۶]. شیانمین‌هان و همکارانش در سال ۲۰۱۹ با در نظر گرفتن نشست زمین در حین عملیات لوله‌رانی در خاک نرم به‌عنوان زمینه‌ی مهندسی، تأثیر عملیات لوله‌رانی در نشست زمین را با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. در این مطالعه آن‌ها بر روی عواملی که عمدتاً بر نشست سطح زمین تأثیر دارند از جمله میزان آزادسازی تنش برجا، فشار محفظه، مدول کشسان خاک، عمق دفن و قطر لوله متمرکز بودند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که قطر لوله و مدول کشسان خاک در فرونشست زمین بیشترین حساسیت و پس از آن به ترتیب عمق قرارگیری و فشار محفظه و در نهایت آزادسازی تنش‌های برجا کمترین حساسیت را دارد [۱۷، ۱۸].

ونجی‌ما و همکاران در سال ۲۰۲۱، مکانیزم اغتشاش خاک و الگوی تغییر شکل خاک را با استفاده از تئوری محیط تصادفی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مناطقی از خاک که تحت تأثیر عملیات لوله‌رانی آشفته شده را

شده است. علاوه بر این در اطراف خط لوله، لوله‌های فاضلاب، آب و گاز وجود دارد [۱۳].

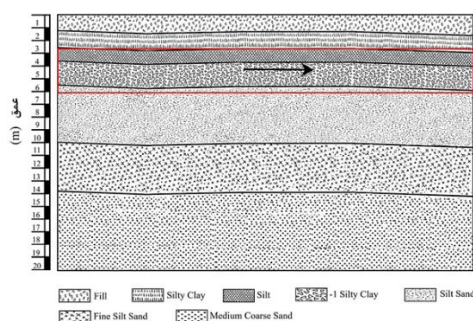
جدول ۱: مشخصات کلی مطالعه میدانی لوله رانی

مطالعه میدانی	قطر خارجی (میلی‌متر)	قطر داخلی (میلی‌متر)	روباره (میلی‌متر)	طول لوله (میلی‌متر)
ونجیما و همکاران	۳۳۰۰	۲۷۲۰	۲۷۵۰	۲۰۰۰

پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک که در پایش میدانی برآورد شده در جدول ۲ و ۳ آورده شده است. البته لازم به ذکر است برخی از خواص فیزیکی خاک از جمله نسبت تخلخل (e)، وزن مخصوص خشک خاک γ_d و وزن مخصوص اشباع خاک γ_{sat} با استفاده روابط ژئوتکنیکی ارزیابی شده‌اند.

با توجه به شرایط واقعی، هر ۲ متر در امتداد خط لوله و بالای محور مرکزی، میخ‌های اندازه‌گیری به‌عنوان نقطه خط‌کش به زمین رانده شده و نشست زمین با استفاده از ایستگاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

با توجه به شکل ۱، خط لوله بین سیلت و خاک رس سیلنتی قرار داشته و عمق سطح زمین تا مرکز خط لوله ۴۴۰۰ میلی‌متر است. به عبارتی ارتفاع روباره ۲۷۵۰ میلی‌متر است.



شکل ۱: لایه‌بندی خاک و جهت پیشرفت خط لوله.

جدول ۲: خصوصیات لایه‌های خاک، لوله رانش، دوغاب و سپر حفاری [۱۳]

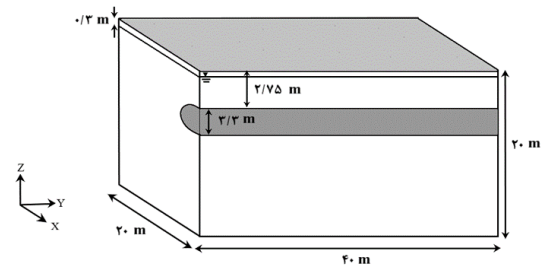
دسته‌بندی خاک	ضخامت (m)	نسبت پواسون	مدول کشسان (Mpa)	وزن مخصوص (kN/m^3)	شاخص خمیری
خاک بالادست	۱٫۳	۰٫۳۳	۷٫۵	۱۸٫۵	-
رس سیلنتی	۰٫۸	۰٫۳۵	۱۲٫۰۳	۲۰	۱۴٫۵
سیلت	۱٫۱	۰٫۳۵	۱۰٫۲۳	۱۹٫۹	۸٫۵
رس سیلنتی - ۱	۲٫۳	۰٫۳۲	۱۲٫۳	۱۹٫۶	۱۵٫۵
ماسه سیلت	۴٫۵	۰٫۳	۵٫۶	۲۰٫۳	۲٫۹
ماسه ریزدانه	۳٫۷	۰٫۲۷	۱۸	۱۸٫۵	۲٫۵
ماسه نسبتاً درشت	۶٫۳	۰٫۲۷	۴۰	۱۸٫۹	۳
لوله‌های رانش	۰٫۲۹	۰٫۲	۳۵۰۰۰	۲۵	-
لایه دوغاب	۰٫۳۴	۰٫۴۸	۰٫۳	۲۰	-
هد دستگاه حفاری	۰٫۳	۰٫۳	۲۰۰۰۰۰	۷۸٫۵	-

جدول ۳: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک [۱۳]

دسته‌بندی خاک	درصد آب	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک ($^\circ$)	ضریب نفوذپذیری (cm/s)
خاک بالادست	۳۲٫۴	۷	۵	$۶٫۸ \times 10^{-۶}$
رس سیلنتی	۳۸٫۹	۲۰٫۶	۲۱٫۵	$۳٫۲ \times 10^{-۶}$
سیلت	۳۴٫۵	۱۰	۲۱٫۵	$۷٫۸ \times 10^{-۵}$
رس سیلنتی - ۱	۳۶٫۸	۲۳	۱۵٫۹	$۳٫۴ \times 10^{-۶}$
ماسه سیلت	۲۸٫۹	۳٫۶	۳۲	$۸٫۲ \times 10^{-۴}$
ماسه ریزدانه	۲۹٫۵	۳	۲۰	$۴٫۶ \times 10^{-۳}$
شن نسبتاً درشت	۲۷٫۶	۲	۲۸	$۹٫۶ \times 10^{-۲}$

۲-۲- هندسه مدل عددی

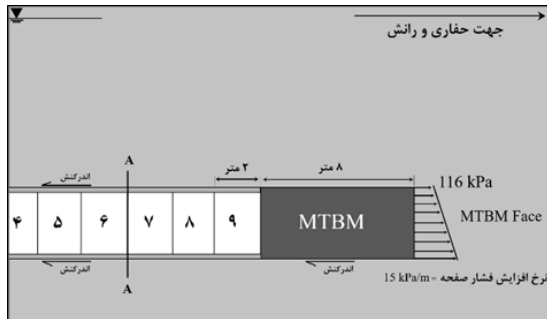
به دلیل تقارن موجود در مدل و همچنین جهت افزایش بازدهی زمانی، نصف مدل جهت شبیه‌سازی انتخاب شد. در محیط‌های کشسان با توجه به روابط کرش فاصله مرکز فضای حفاری تا مرز مدل (6r) در نظر گرفته می‌شود. در محیط‌های کشسان خمیری نیز این فاصله برابر (12r) به عبارتی (6D) لحاظ می‌شود [۱۹]. بر این اساس و با توجه به دقت و صحت نتایج شبیه‌سازی، عرض مدل سه‌بعدی ایجاد شده در این مطالعه حدود ۶ برابر قطر فضای حفاری یعنی ۲۰ متر در نظر گرفته شد. سطح زمین به‌عنوان مرز بالایی مدل فرض شد؛ بنابراین مطابق شکل ۲ بر اساس سیستم مختصات جهانی، مدل ۲۰ متر در امتداد محور X، 40 متر در امتداد محور Y و ۲۰ متر در امتداد محور Z در نظر گرفته شد.



شکل ۲: مدل هندسی فضای حفاری شده.

۲-۴- فشار صفحه حفاری

با توجه به شکل ۴ فشار صفحه حفاری برابر ۱۱۶ کیلو پاسکال است که با نرخ ۱۵ کیلو پاسکال به ازای هر متر در راستای قطر افزایش می‌یابد. بدین ترتیب فشار صفحه حفاری در قسمت پایین ۱۶۵/۵ کیلو پاسکال خواهد بود. لازم به ذکر است در مدل عددی فشار صفحه حفاری به‌صورت بار سطحی خارجی و عمود بر سطح اعمال شد. گرادیان افزایشی در راستای عمق نیز بدین‌صورت تعریف شد که ابتدا نقطه مرجع قسمت تاج خط لوله در نظر گرفته شد و با افزایش فاصله از آن بر فشار صفحه حفاری با گرادیان مشخص شده افزوده می‌شود. در نهایت مدل عددی شبیه‌سازی شده به‌صورت استاتیکی تحلیل شد.



شکل ۴: جزئیات فشار صفحه حفاری در مدل عددی.

۲-۵- فشار تزریق دوغاب

مقطع عرضی خط لوله در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل فشار تزریق دوغاب پشت لوله‌های رانش نیز برابر ۵۰ کیلو پاسکال است که با نرخ ۱۷ کیلو پاسکال به ازای هر متر در راستای قطر افزایش می‌یابد. بدین ترتیب فشار تزریق دوغاب در قسمت پایین لوله‌های رانش ۱۰۵ کیلو پاسکال خواهد بود.

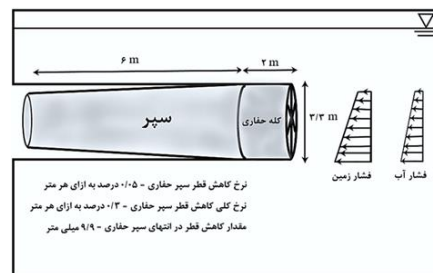
فشار تزریق دوغاب نیز به‌صورت بار سطحی خارجی و عمود بر سطح تعریف شد. گرادیان افزایشی در راستای عمق نیز همانند فشار صفحه حفاری با تعیین نقطه مرجع در قسمت تاج خط لوله تعریف شد.



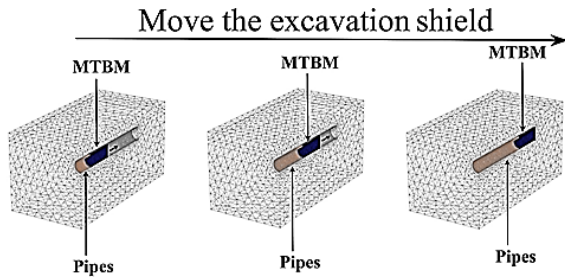
شکل ۵: فشار تزریق دوغاب پشت خط لوله.

۲-۳- سپر حفاری در مدل عددی

سپر حفاری دارای طول ۸ متر است که ۲ متر ابتدایی آن شامل کله حفاری بوده و ۶ متر بقیه سپر است. به‌منظور اعمال تریخیس تنش در فضای حفاری شده سپر حفاری به‌صورت مخروطی شبیه‌سازی شد. با توجه به شکل ۳ کله حفاری به‌صورت کاملاً استوانه‌ای و سپر به‌صورت مخروطی است. 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.



شکل ۳: سپر حفاری مخروطی در مدل عددی.



شکل ۷: مراحل حفاری و حرکت سپر.

۲-۹- معیار شکست و آنالیز حساسیت

معیار موهر کلمب یکی از ساده‌ترین و درعین‌حال مهم‌ترین معیارهای شکست است که به‌طور گسترده در مکانیک سنگ و مکانیک خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل ارائه شده نیز از معیار شکست موهر کلمب استفاده شده است. مدل کشسان خمیری کامل موهر کلمب شامل تعداد محدودی از ویژگی‌ها است که رفتار خاک را در واقعیت نشان می‌دهد.

تحلیل حساسیت، به مطالعه و بررسی تأثیرپذیری پارامترهای خروجی از پارامترهای ورودی یک مدل گفته می‌شود. 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 به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود؛ یعنی برابر نسبت انحراف نسبی ($\delta_p = |\Delta P/P^*|$) به انحراف نسبی پارامتر ($\delta_\alpha = |\Delta \alpha_k / \alpha_k^*|$) خواهد بود.

$$P = f\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n\}$$

$$P = f\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n\}$$

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

در رابطه (۱) اگر مقدار کمیت $|\Delta \alpha_k / \alpha_k^*|$ دارای مقادیر کوچک باشد، رابطه $S_k(\alpha)$ می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت.

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

با قرار دادن پارامتر α_k^* برابر α_k شاخص حساسیت (S_k^*) پارامتر α_k همان‌طور که در رابطه (۳) مشاهده می‌شود، به دست خواهد آمد [۱۷].

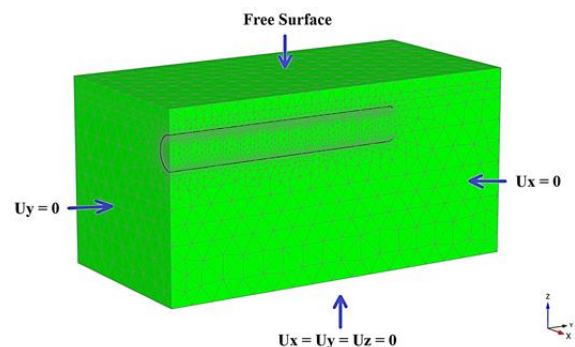
۲-۶- جزء بندی مدل

پروژه برای انجام محاسبات اجزای محدود به جزءهای کوچک تقسیم می‌شود. اندازه مش‌ها باید به‌اندازه کافی ریز باشد تا دقت نتایج به‌دست‌آمده تأیید شود. از طرف دیگر، بایستی از ایجاد مش‌های بسیار ریز هم خودداری کرد زیرا این امر منجر به کاهش بازدهی زمانی خواهد شد.

برنامه پلکسیس از نسل کاملاً خودکار برای مش‌زنی استفاده می‌کند. تحلیل مسئله به‌صورت کشسان و از نوع استاتیکی بوده و ۱۰ متر ابتدایی خط لوله به‌صورت حفاری شده در نظر گرفته شد و سپر حفاری و لوله‌های رانش در جایگاه خود قرار گرفتند. در این فاز فشار صفحه حفاری، فشار دوغاب، نیروی رانش، اندرکنش بین سپر حفاری و خاک اطراف و همچنین اندرکنش بین لوله‌های رانش و خاک اطراف اعمال گردید.

۲-۷- شرایط مرزی

مطابق شکل ۶، شرایط مرزی کف مدل به‌صورت مرز صلب یعنی جابجایی در هر سه جهت برابر صفر در نظر گرفته شد و مرزهای کناری نیز در جهت نرمال بسته شد. سطح مدل هم به‌صورت سطح آزاد عمل می‌کند تا طی عملیات، نشست‌ها و برآمدگی‌ها ارزیابی شود.



شکل ۶: شرایط مرزی مدل عددی شبیه‌سازی شده.

۲-۸- مراحل مدل‌سازی

در لوله‌رانی عملیات حفاری، رانش لوله‌ها و تزریق دوغاب به‌صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد؛ بنابراین در مدل عددی نیز این پارامترها به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شد. در ادامه ۸ گام حفاری به‌اندازه ۲ متر به‌اندازه طول هر حلقه تک لوله تعریف شد. در شکل ۷ نمای کلی مراحل حفاری و حرکت سپر و لوله‌های رانش آورده شده است.

معرف این اجزاء محدود هستند، بر روی گره‌ها تشکیل می‌شود. در نهایت معادلات رفتاری برای هر کدام از گره‌ها محاسبه شده و در نهایت کل مسئله تحلیل می‌شود.

۲-۱۱- نرم‌افزار پلکسیس

در این پژوهش مدل‌سازی با استفاده از نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار اجزاء محدود پلکسیس صورت گرفته و نسخه‌ای که استفاده شده ورژن ۲۰۲۰ نرم‌افزار است. از قابلیت‌های مهم ورژن ۲۰۲۰ این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) امکان مدل‌سازی سازه‌های سطحی و زیرسطحی

در محیط‌های خاکی و سنگی

(۲) تحلیل مسائل به روش‌های استاتیکی و دینامیکی

(۳) ارائه خروجی‌های قدرتمند

از مزیت‌هایی که این نسخه از نرم‌افزار دارد، استفاده از یک سری گمانه‌های اکتشافی جهت تعریف لایه‌بندی خاک است که امکان تعیین یک چینه نگاری غیر افقی خاک یا یک سطح زمین مایل فراهم می‌کند. همچنین این نسخه از نرم‌افزار از نسل کاملاً خودکار برای مش‌زنی اجزاء محدود استفاده می‌کند.

۲-۱۲- نوع جزء بندی

پروژه برای انجام محاسبات اجزای محدود باید جزء بندی شود. جزءها باید به اندازه کافی ریز باشد تا نتایج عددی دقیق به دست آید. از طرف دیگر، باید از ایجاد جزءهای بسیار ریز هم خودداری کرد زیرا این امر منجر به زمان محاسبه بیش‌ازحد خواهد شد. المان‌های اساسی خاک به صورت سه‌بعدی و چهارضلعی (چهاروجهی) و ۱۰ گرهی هستند برای صفحات و ژئوگریدها نیز از المان‌های ۶ گره‌ای استفاده شد.

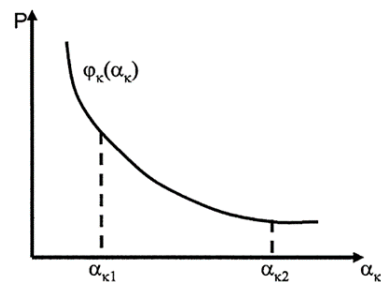
۲-۱۳- صحت سنجی مدل عددی

مقایسه تغییر شکل سطحی زمین به صورت پروفیل عرضی و طولی مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل عددی در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به اینکه در مطالعات میدانی سنجشگرها در فاصله ۶ متری پشت سپر حفاری عملیات اندازه‌گیری را انجام داده‌اند، مقادیر نظری و مدل‌سازی عددی نیز در همان فاصله مورد بررسی قرار گرفت. میزان اختلاف مقادیر میدانی اندازه‌گیری شده و عددی در شکل ۱۱ آورده شده است.

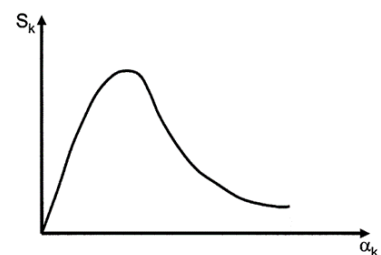
α_k متغیر بررسی شده است (مثل E که مدول کشسان است). α_k^* کمیت پارامتر بررسی شده در حالت مرجع و پایه است (مثلاً برای مدول کشسان ۵ حالت بررسی شده که حالت پایه آن مدنظر است). S_k^* شاخص حساسیت است که بدون بعد است. لازم به ذکر است روابط پارامترهای بررسی شده با استفاده از رابطه (۲) که تابع حساسیت (S_k) است، بدون بعد می‌شود. P نیز متغیری است که تأثیر پارامترها در آن متغیر بررسی می‌شود که در این مطالعه نشست سطح زمین (u) است.

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

در روابط فوق، K شامل اعداد مثبت است (K=1, 2, 3, ... n) و هرچقدر S_k^* کمیت بالایی داشته باشد، P نسبت به پارامتر α حساس‌تر خواهد بود. شکل ۸ شماتیکی از تابع ($\alpha_k - P$) و شکل ۹ نیز منحنی تابع حساسیت ($\alpha_k - S_k$) را نشان می‌دهد.



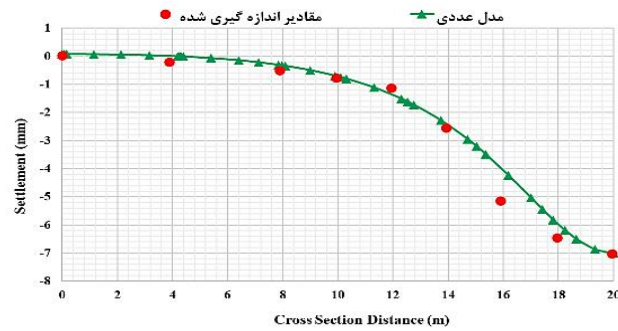
شکل ۸: سیستم منحنی ($\alpha_k - P$).



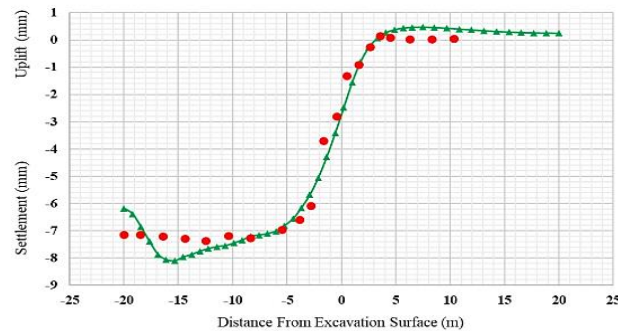
شکل ۹: منحنی تابع حساسیت ($\alpha_k - S_k$).

۲-۱۰- روش اجزاء محدود

اجزاء محدود روشی عددی برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی است که بر اساس یک یا دو متغیر مکانی تعریف شده است. در این روش، برای حل مسئله یک سیستم بزرگ به اجزای مجزا تقسیم می‌شود. جهت کاهش خطاها می‌توان از جزءهای بیشتری استفاده کرد. سپس به منظور محاسبه مجهولات مسئله، معادلات ساده‌ای که

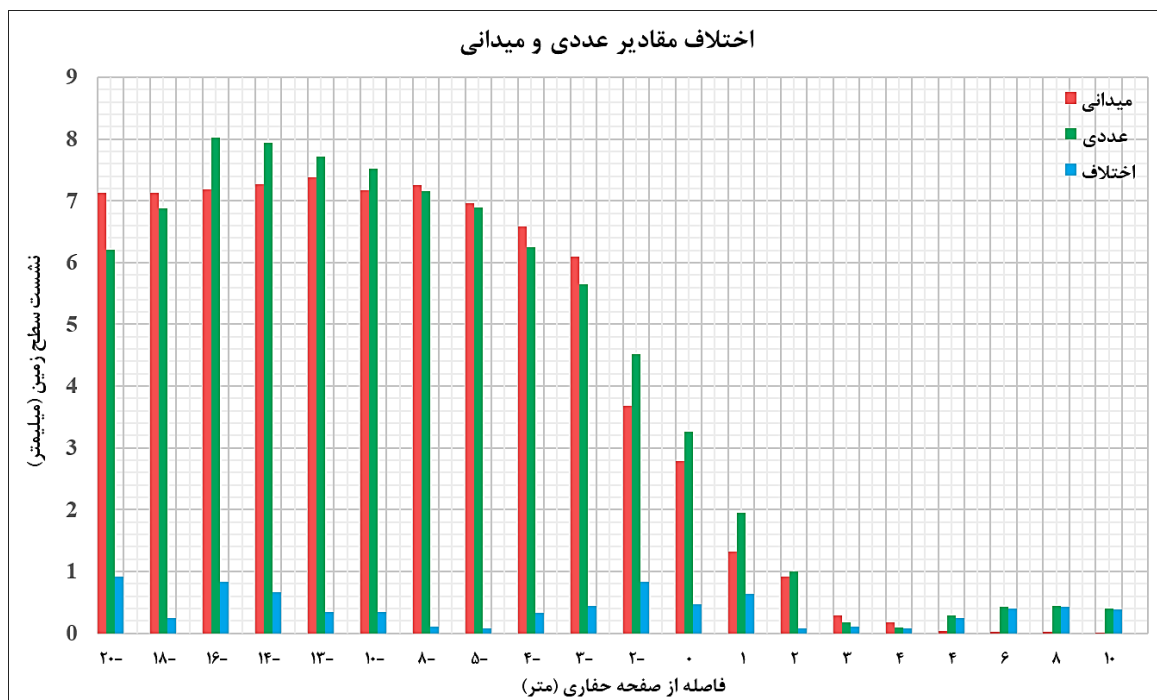


(الف)



(ب)

شکل ۱۰: صحت سنجی منحنی نشست. (الف) طولی، (ب) عرضی [۱۳].



شکل ۱۱: اختلاف مقادیر میدانی اندازه‌گیری شده و عددی.

۳- بحث و بررسی

۳-۱- برآمدگی سطح زمین

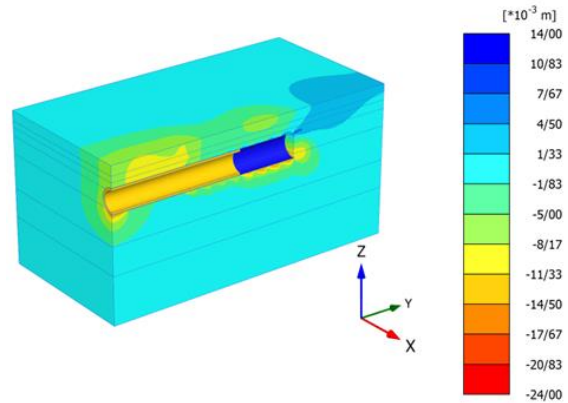
پتانسیل تورم‌پذیری خاک با خاصیت خمیری زیاد نیز یکی از دلایل مهم در برآمدگی سطح است. طبق مطالعات میدانی حداکثر برآمدگی 2.4D به عبارتی حدود ۸ متر مقابل دستگاه حفاری رخ می‌دهد و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۲ مدل عددی نیز این امر را تأیید می‌کند.

عملکرد ترکیبی نیروی پیشران مثبت و فشار صفحه حفاری، برآمدگی سطح را در پی خواهد داشت. البته

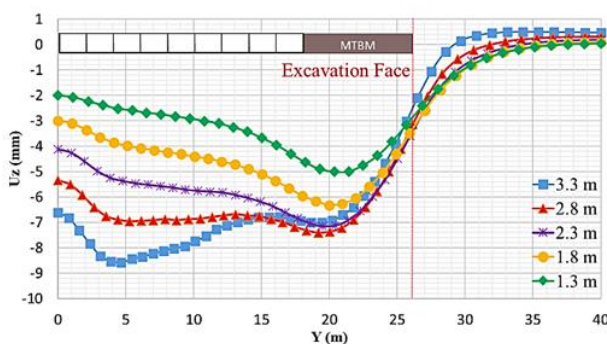
۲-۳- تأثیر پارامترهای اساسی در نشست سطح زمین

محاسبات نظری، اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی عددی، همگی شروع نشست در محوطه تقریباً 1D در مقابل صفحه حفاری را برآورد می‌کنند و پس‌از آن مقدار نشست به‌سرعت افزایش می‌یابد.

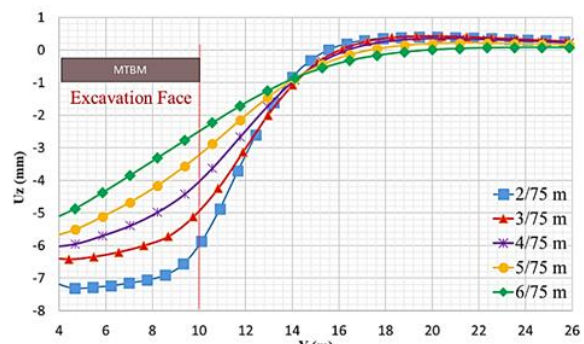
نشست سطح زمین در طول عملیات لوله‌رانی تحت تأثیر پارامترهای مختلف در شکل ۱۳ آورده شده است.



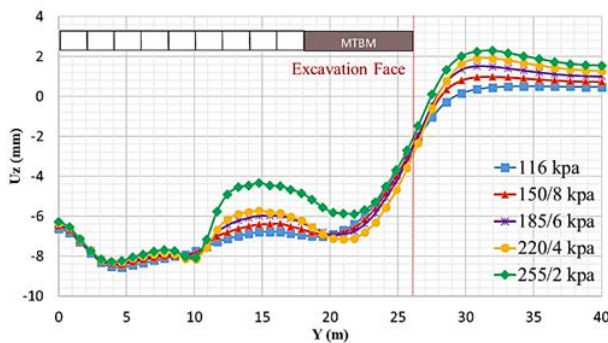
شکل ۱۲: کانتور سب‌بعدی جابجایی عمودی در پیشروی ۲۶ متری.



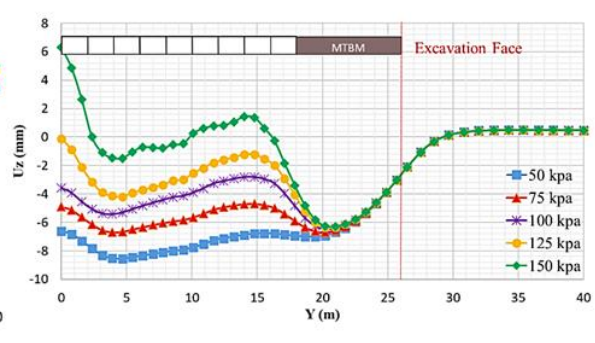
(ب)



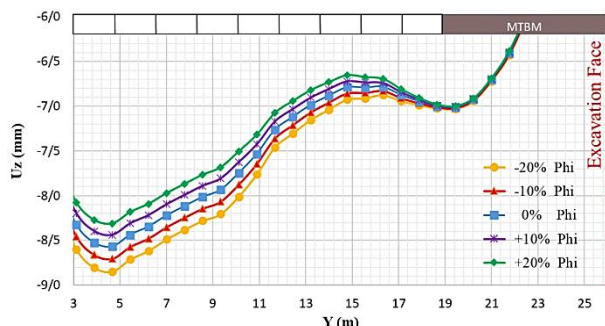
(الف)



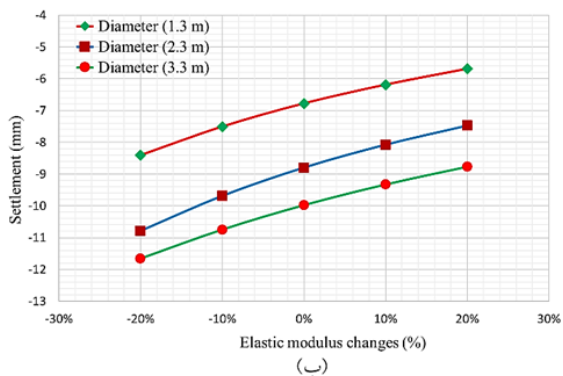
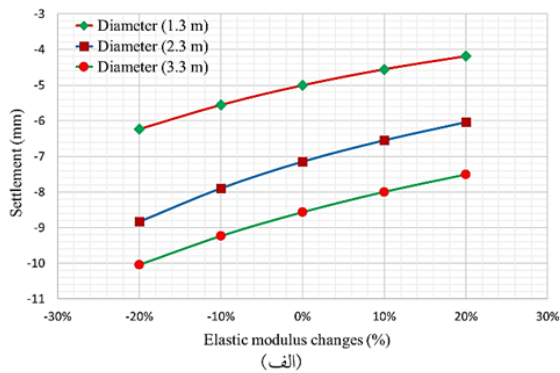
(د)



(ج)



شکل ۱۳: تأثیر پارامترهای اساسی در نشست سطحی. الف) روباره، ب) قطر، ج) فشار دوغاب، د) فشار صفحه حفاری، ه) مدول کشسان، و) زاویه اصطکاک داخلی.



شکل ۱۵: تأثیر هم‌زمان مدول کشسان و قطر در جابجایی. (الف) سطح زمین، (ب) تاج خط لوله.

افزایش مدول کشسان، کاهش نشست را در پی دارد و افزایش قطر نیز افزایش نشست را به دنبال خواهد داشت. همان‌طور که طبق شکل ۱۵ مشخص است، بیشترین نشست در سطح زمین مربوط به بزرگ‌ترین قطر یعنی ۳/۳ متر و تغییرات مدول کشسان (۲۰- درصد) بوده و مقدار کمیت آن برابر ۱۰/۰۵ میلی‌متر است.

حداقل نشست نیز مربوط به کمترین قطر یعنی ۱/۳ متر و تغییرات مدول کشسان (۲۰+ درصد) بوده و مقدار آن برابر ۴/۱۹ میلی‌متر است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش ۱۵۴ درصد قطر و افزایش ۴۰ درصد مدول کشسان، نشست سطح زمین ۱۴۰ درصد به عبارتی ۲/۴ برابر کاهش پیدا می‌کند.

در تاج خط لوله نیز با کاهش ۱۵۴ درصد قطر و افزایش ۴۰ درصد مدول کشسان، نشست سطح زمین ۱۰۵ درصد به عبارتی ۲ برابر کاهش پیدا می‌کند.

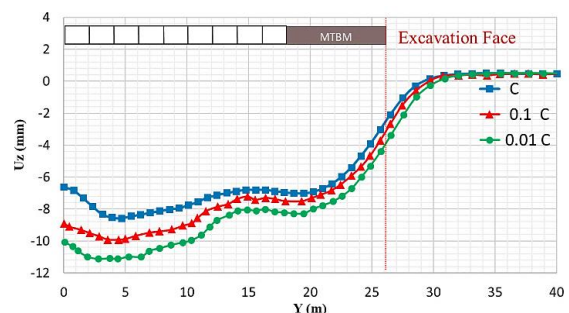
در شکل ۱۶ تأثیر هم‌زمان دو پارامتر روباره و چسبندگی بررسی شده است. در اینجا نیز ۰ درصد مقدار پایه چسبندگی است و در ۳ حالت مختلف با کاهش ۹۰ و ۹۹ درصدی بررسی‌ها انجام شد. مقادیر روباره نیز ۳ حالت (۲/۷۵، ۳/۷۵ و ۴/۷۵ متر) در نظر گرفته شده است. مقادیر

با توجه به مخروطی بودن سپر حفاری می‌توان اظهار داشت که بیشترین اضافه حفاری در قسمت انتهایی سپر خواهد بود؛ بنابراین با در نظر گرفتن ترخیص تنش، بیشترین جابجایی در این ناحیه رخ خواهد داد. نشست زمین طی عملیات لوله‌رانی عمدتاً نتیجه عملکرد ترکیبی نیروی پیشران مثبت، تخریب لایه و اصطکاک است.

همان‌طور که طبق شکل مشخص است، سپر حفاری در تجزیه و تحلیل‌ها در ۲۶ متری از خط لوله قرار دارد (به جز شکل الف). تعداد گام‌های حفاری شده نیز ۸ تا بوده که در آخرین گام حفاری بررسی‌ها انجام شده است.

به‌منظور بررسی تأثیر چسبندگی خاک در الگوی تغییر شکل زمین نیز از ۳ حالت مختلف برای ۷ لایه خاک استفاده شد. سه شرایط مختلف چسبندگی به صورت ۱ و ۰/۱ و ۰/۰۱ برابر مقدار اولیه برای مدل‌سازی انتخاب شد. به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت از مقدار چسبندگی به درصد (0, 90, 99) مقدار اولیه کاسته می‌شود.

شکل ۱۴ تأثیر پارامتر چسبندگی را در میزان جابجایی سطحی زمین نشان می‌دهد.



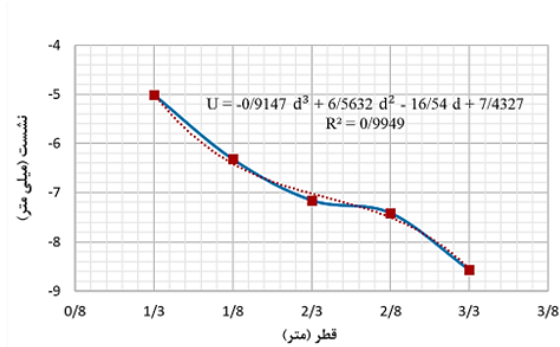
شکل ۱۴: تأثیر چسبندگی در جابجایی سطح زمین.

در شکل ۱۵ تأثیر هم‌زمان دو پارامتر قطر و مدول کشسان بررسی شده است. لازم به ذکر است ۰ درصد مقدار مرجع و پایه مدول کشسان است و در ۵ حالت مختلف با افزایش و کاهش ۱۰ و ۲۰ درصدی بررسی‌ها انجام شده است.

مقادیر قطر نیز ۳ حالت (۱/۳، ۲/۳ و ۳/۳ متر) در نظر گرفته شده است. مقادیر جابجایی شامل حداکثر مقدار نشست در سطح زمین و تاج خط لوله است.

تأثیر پارامتر قطر در نشست زمین به صورت کامل بررسی می‌شود و بقیه پارامترها نیز به همین صورت خواهد بود.

در گام نخست مقادیر نشست در حالات مختلف قطر برآورد شده و رابطه آن با جابجایی به صورت شکل ۱۷ تخمین زده شد.



شکل ۱۷: رابطه قطر فضای حفاری با نشست.

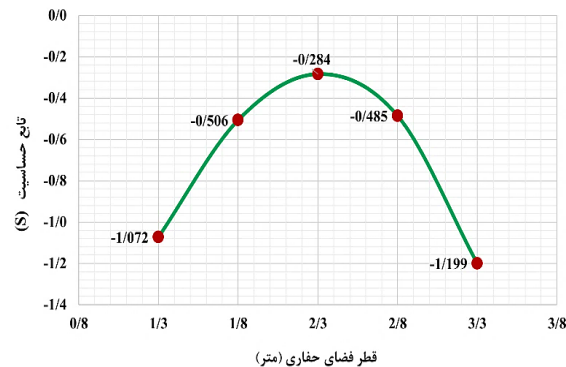
ارتباط بین قطر با نشست به صورت رابطه ۴ است. لازم به ذکر است ضریب همبستگی (R) میزان صحت رابطه را نشان می‌دهد که هرچقدر به ۱ نزدیک باشد دارای صحت بیشتری خواهد بود.

$$U = -0.914 d^3 + 6.56 d^2 - 16.54 d + 7.43 \quad (4)$$

تابع حساسیت پارامتر قطر که کمیتی بدون بعد است به صورت رابطه ۵ خواهد شد.

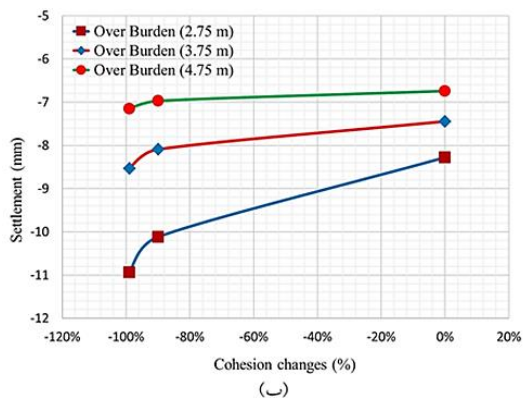
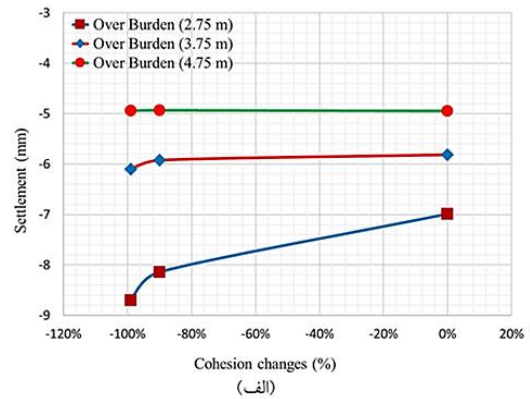
$$SI_d = \left| \frac{du}{dd} \right| \frac{d}{u} = \frac{|-2.74 d^2 + 13.12 d - 16.54| \times d}{-0.91 d^3 + 6.56 d^2 - 16.54 d + 7.43} \quad (5)$$

با قرار دادن مقادیر قطرهای بررسی شده در رابطه تابع حساسیت، نمودار (قطر - تابع نشست) به صورت شکل ۱۸ خواهد شد.



شکل ۱۸: منحنی تابع حساسیت قطر فضای حفاری.

جابجایی شامل حداکثر مقدار نشست در سطح زمین و تاج خط لوله است.



شکل ۱۶: تأثیر هم‌زمان چسبندگی و روباره در جابجایی. الف) سطح زمین، ب) تاج خط لوله.

در شکل ۱۵ و ۱۶، اثر ترکیبی دو پارامتر در نشست سطح زمین و تاج خط لوله در فاصله ۷۵ سانتی‌متری از لوله مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در گام بعد به بررسی رابطه هر یک از پارامترها با نشست سطح زمین خواهیم پرداخت. در جدول ۴ رابطه هر یک از پارامترها آورده شده است. بدین ترتیب پس از مشخص شدن رابطه هر پارامتر با میزان نشست سطح، آنالیز حساسیت آن‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جدول ۴: رابطه هر پارامتر با نشست سطح زمین

$U = 0.0483 O^3 - 0.803 O^2 + 4.5689 O - 14.807$	روباره
$U = -0.9147 d^3 + 6.5632 d^2 - 16.54 d + 7.4327$	قطر
$U = 8 \times 10^{-6} G^3 - 0.0029 G^2 + 0.3367 G - 19.114$	فشار دوغاب
$U = -2 \times 10^{-5} P^2 + 0.0088 P - 9.3396$	فشار صفحه حفاری
$U = 0.0724 E - 8.582$	مدول الاستیک
$U = -0.013 \phi - 8.57$	زاویه اصطکاک
$U = 0.2367 \ln(C) - 7.6371$	چسبندگی

جدول ۶: آنالیز حساسیت (روباره، قطر، فشار دوغاب و صفحه حفاری)

S	SI	روباره (متر)
-۰٫۴۷۰	-۰٫۴۷۰	۲٫۷۵
	-۰٫۳۴۱	۲٫۷۵
	-۰٫۱۶۵	۳٫۷۵
	-۰٫۱۲۲	۴٫۷۵
	-۰٫۳۹۱	۵٫۷۵
S	SI	قطر (متر)
-۱٫۱۹۹	-۱٫۰۷۲	۱٫۳
	-۰٫۵۰۶	۱٫۸
	-۰٫۲۸۴	۲٫۳
	-۰٫۴۸۵	۲٫۸
	-۱٫۱۹۹	۳٫۳
S	SI	فشار دوغاب (کیلوپاسکال)
-۰٫۶۲۶	-۰٫۶۲۶	۵۰
	-۰٫۴۰۵	۷۵
	-۰٫۰۵۱	۱۰۰
	-۰٫۲۴۸	۱۲۵
	-۰٫۱۴۷	۱۵۰
S	SI	فشار صفحه حفاری (کیلوپاسکال)
-۰٫۰۵۶	-۰٫۰۵۶	۱۱۶
	-۰٫۰۴۹	۱۵۰٫۸
	-۰٫۰۳۰	۱۸۵٫۶
	-۰٫۰۰۱	۲۲۰٫۴
	-۰٫۰۴۳	۲۵۵٫۲

در جدول ۷ و ۸ آنالیز حساسیت مربوط به پارامتر ژئوتکنیکی مدول کشسان و زاویه اصطکاک داخلی آورده شده است.

لازم به ذکر است با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، تراکم بین دانه‌های خاک بیشتر شده که در نهایت منجر به کاهش جابجایی‌ها می‌شود. ارتباط بین زاویه اصطکاک و نشست به صورت خطی است یعنی با افزایش زاویه اصطکاک میزان نشست به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند.

ارتباط بین مدول کشسان و نشست نیز به صورت خطی با افزایش مدول کشسان کاهش پیدا می‌کند.

تابع حساسیت پارامتر ژئوتکنیکی مدول کشسان، به صورت رابطه (۴) خواهد بود.

$$SI_E = \left| \frac{du}{dE} \right| \frac{E}{u} = \frac{|0.0724| \times E}{0.0724 E - 8.582} \quad (4)$$

با قرار دادن مقادیر پایه در تابع حساسیت، شاخص حساسیت پارامتر قطر مشخص خواهد شد.

تابع حساسیت یک تابع بی‌بعد بوده که با در نظر گرفتن مقدار متغیر یک کمیت عددی را در اختیار ما قرار می‌دهد. در جدول ۵ تابع حساسیت و شاخص حساسیت مربوط به پارامتر چسبندگی آورده شده است.

هرچقدر شاخص حساسیت عدد بزرگ‌تری باشد عامل انتخابی تأثیر بیشتری روی نشست دارد البته علامت منفی که در محاسبات لحاظ شده است جهت کاهش یا افزایشی بودن پارامتر است و در نتایج تأثیری ندارد.

جدول ۵: آنالیز حساسیت چسبندگی (SI): تابع حساسیت، S: شاخص حساسیت)

S	SI	C (Kpa)	لایه
-۰٫۰۵۷	-۰٫۰۴۵	۰٫۰۷	مواد بالادست
	-۰٫۰۴۵	۰٫۰۷	
-۰٫۰۶۱	-۰٫۰۵۷	۷	رس سیلتی
	-۰٫۰۴۸	۰٫۲۰۶	
	-۰٫۰۵۴	۲٫۰۶	
-۰٫۰۵۹	-۰٫۰۶۱	۲۰٫۶	سیلت
	-۰٫۰۴۶	۰٫۱	
	-۰٫۰۵۲	۱	
	-۰٫۰۵۹	۱۰	
-۰٫۰۶۲	-۰٫۰۴۸	۰٫۲۳	رس سیلتی - ۱
	-۰٫۰۵۴	۲٫۳	
	-۰٫۰۶۲	۲۳	
-۰٫۰۵۵	-۰٫۰۴۴	۰٫۰۳۶	ماسه سیلت
	-۰٫۰۴۹	۰٫۳۶	
-۰٫۰۵۵	-۰٫۰۵۵	۳٫۶	ماسه سیلت ریز
	-۰٫۰۴۴	۰٫۰۳	
	-۰٫۰۴۹	۰٫۰۳	
-۰٫۰۵۴	-۰٫۰۵۵	۳	ماسه نسبتاً درشت
	-۰٫۰۴۳	۰٫۰۲	
-۰٫۰۶۲	-۰٫۰۴۸	۰٫۰۲	پیشینه
	-۰٫۰۵۴	۲	

در جدول ۶ آنالیز حساسیت مربوط به چهار پارامتر روباره، قطر، فشار دوغاب و فشار صفحه حفاری آورده شده است.

بیشترین مقدار را نسبت به سایر لایه‌ها دارد؛ بنابراین این لایه دارای اهمیت بیشتری نسبت به تغییرات مدول کشسان است. تابع حساسیت پارامتر زاویه اصطکاک داخلی نیز به صورت رابطه (۵) خواهد بود.

$$SI_{\phi} = \left| \frac{du}{d\phi} \right| \frac{\phi}{u} = \frac{0.013 \phi}{0.013 \phi - 8.57} \quad (5)$$

جدول ۸: آنالیز حساسیت زاویه اصطکاک داخلی

S	SI	ϕ (°)	لایه
۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۴	مواد بالادست
	۰٫۰۱۰	۴٫۵	
	۰٫۰۱۱	۵	
	۰٫۰۱۲	۵٫۵	
۰٫۰۴۷	۰٫۰۳۸	۱۷٫۲	رس سیلتی
	۰٫۰۴۲	۱۹٫۳۵	
	۰٫۰۴۷	۲۱٫۵	
	۰٫۰۵۱	۲۳٫۶۵	
۰٫۰۴۷	۰٫۰۵۶	۲۵٫۸	سیلت
	۰٫۰۳۸	۱۷٫۲	
	۰٫۰۴۲	۱۹٫۳۵	
	۰٫۰۵۱	۲۳٫۶۵	
۰٫۰۳۵	۰٫۰۲۸	۱۲٫۷۲	رس سیلتی ۱-
	۰٫۰۳۲	۱۴٫۳۱	
	۰٫۰۳۵	۱۵٫۹	
	۰٫۰۳۹	۱۷٫۴۹	
۰٫۰۶۸	۰٫۰۴۲	۱۹٫۰۸	ماسه سیلت
	۰٫۰۵۵	۲۵٫۶	
	۰٫۰۶۲	۲۸٫۸	
	۰٫۰۶۸	۳۲	
۰٫۰۶۸	۰٫۰۷۵	۳۵٫۲	ماسه نسبتاً درشت
	۰٫۰۸۱	۳۸٫۴	
	۰٫۰۳۵	۱۶	
	۰٫۰۴۰	۱۸	
۰٫۰۴۴	۰٫۰۴۴	۲۰	ماسه سیلت ریز
	۰٫۰۴۸	۲۲	
	۰٫۰۵۲	۲۴	
	۰٫۰۴۹	۲۴٫۴	
۰٫۰۶۰	۰٫۰۵۵	۲۵٫۲	ماسه نسبتاً درشت
	۰٫۰۶۰	۲۸	
	۰٫۰۶۶	۳۰٫۸	
	۰٫۰۷۱	۳۳٫۶	
۰٫۰۶۸			بیشینه

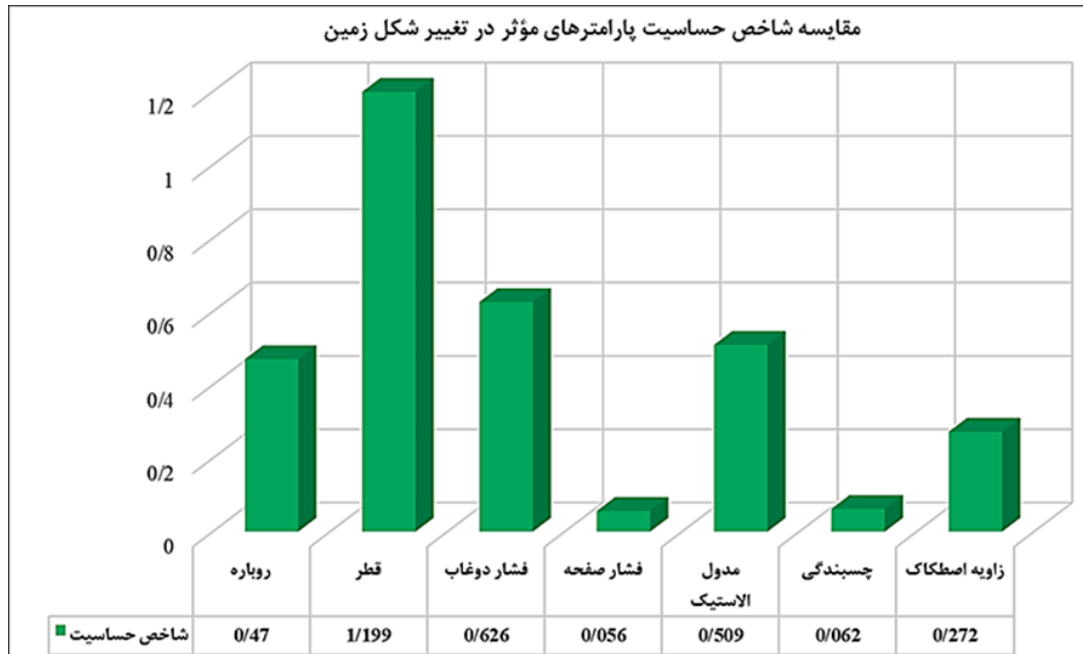
جدول ۷: آنالیز حساسیت مدول کشسان

S	SI	E (Mpa)	لایه
-۰٫۰۶۸	-۰٫۰۵۳	۶	مواد بالادست
	-۰٫۰۶۰	۶٫۷۵	
	-۰٫۰۶۸	۷٫۵	
	-۰٫۰۷۵	۸٫۲۵	
-۰٫۰۸۲	-۰٫۰۸۲	۹	رس سیلتی
	-۰٫۰۸۸	۹٫۶۲	
	-۰٫۱۰۱	۱۰٫۸۳	
	-۰٫۱۱۳	۱۲٫۰۳	
-۰٫۰۹۴	-۰٫۱۱۳	۱۲٫۲۳	سیلت
	-۰٫۱۲۶	۱۳٫۲۳	
	-۰٫۱۳۹	۱۴٫۴۴	
	-۰٫۰۷۴	۸٫۱۸	
-۰٫۰۹۴	-۰٫۰۸۴	۹٫۲۱	رس سیلتی ۱-
	-۰٫۰۹۴	۱۰٫۲۳	
	-۰٫۱۰۵	۱۱٫۲۵	
	-۰٫۱۱۶	۱۲٫۲۸	
-۰٫۱۱۶	-۰٫۰۹۱	۹٫۸۴	ماسه سیلت
	-۰٫۱۰۳	۱۱٫۰۷	
	-۰٫۱۱۶	۱۲٫۳	
	-۰٫۱۲۹	۱۳٫۵۳	
-۰٫۱۱۶	-۰٫۱۴۲	۱۴٫۷۶	ماسه سیلت ریز
	-۰٫۰۳۹	۴٫۴۸	
	-۰٫۰۴۴	۵٫۰۴	
	-۰٫۰۵۰	۵٫۶	
-۰٫۱۵۰	-۰٫۰۵۵	۶٫۱۶	ماسه نسبتاً درشت
	-۰٫۰۶۰	۶٫۷۲	
	-۰٫۱۳۸	۱۴٫۴	
	-۰٫۱۵۸	۱۶٫۲	
-۰٫۱۷۹	-۰٫۱۷۹	۱۸	ماسه نسبتاً درشت
	-۰٫۲۰۱	۱۹٫۸	
	-۰٫۲۲۳	۲۱٫۶	
	-۰٫۳۷۰	۳۲	
-۰٫۵۰۹	-۰٫۴۳۶	۳۶	ماسه نسبتاً درشت
	-۰٫۵۰۹	۴۰	
	-۰٫۵۹۰	۴۴	
	-۰٫۶۸۱	۴۸	
-۰٫۵۰۹			بیشینه

در جدول ۷ و ۸ علاوه بر ارزیابی شاخص حساسیت برای کل مدل، شاخص حساسیت هر لایه نیز مشخص شده است. به عبارتی حساسیت هر یک از لایه‌ها نسبت به تغییرات پارامترهای مدول کشسان یا چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مشخص شده است. باتوجه به جدول ۷ شاخص حساسیت لایه خاک زیرین -۰٫۵۰۹ است که

طبق مشاهدات، قطر فضای حفاری با شاخص حساسیت ۱/۱۹۹ بیشترین حساسیت و فشار صفحه حفاری با شاخص حساسیت ۰/۰۵۶ کمترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترها دارند. شاخص حساسیت مربوط پارامترهای بررسی شده در شکل ۱۹ آورده شده است.

مطابق جدول ۸ شاخص حساسیت لایه خاک (شن سیلتی) برابر ۰/۲۷۲- بوده و بیشترین مقدار را نسبت به سایر لایه‌ها دارد؛ بنابراین این لایه تأثیرپذیری بیشتری نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک دارد.



شکل ۱۹: نمودار شاخص حساسیت پارامترهای مؤثر در جابجایی زمین.

۸۵۸). افت چسبندگی لایه‌های خاک، افزایش نشست را به دنبال دارد و اگر کاهش چسبندگی در محدوده بالای ۹۰ درصد مقدار اولیه باشد، نشست سطح زمین افزایش چشمگیری خواهد داشت. لازم به ذکر است شاخص حساسیت لایه خاکی که خط لوله از آن عبور می‌کند (رس سیلتی-۱) برابر ۰/۰۶۲- بوده و بیشترین مقدار را نسبت به سایر لایه‌ها دارد؛ بنابراین این لایه دارای اهمیت بیشتری است.

مراجع

- [1] Sherizadeh, H., & Dehghan, S. (2017). 3D Modeling of Intersection between line 6 and 7 Tunnels of Tehran Subway to determine the Best Excavation Sequence for Non-Level Crossing Tunnels. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 6(12), 77-89. (In Persian).
- [2] Baghban Golpasand, M. R., Abbaszadeh, M., Rezaei Farei, A., & Alavi, S. G. (2022). Numerical Study of the Impressionability of Ground Settlement due to Excavation of Tabriz Metro Tunnel, Line 2, from the Coefficient of Lateral Earth Pressure (K_0). *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*. (In Persian).

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی تأثیر پارامترهای اساسی در نشست سطح زمین با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود پلکسیس پرداخته شد. سپس در گام بعد آنالیز حساسیت پارامترهای موردبررسی مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق مشاهدات، ترتیب حساسیت پارامترها به صورت $(D > G > P > C > \phi > O > E)$ است. نتایج نشان می‌دهد، قطر فضای حفاری بیشترین حساسیت و فشار صفحه حفاری کمترین حساسیت را نسبت به سایر متغیرها در نشست سطح زمین دارد؛ بنابراین بایستی دقت و صحت بیشتری در برآورد نمودن آن‌ها در مطالعات اولیه بکار گرفته شود.

طبق مشاهدات ارتباط بین زاویه اصطکاک و نشست به صورت خطی است؛ یعنی با افزایش زاویه اصطکاک میزان نشست به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند $(U = -8.57 \phi)$. ارتباط بین مدول الاستیک و نشست نیز به صورت خطی است. پس با افزایش مدول الاستیک میزان نشست به صورت خطی کاهش پیدا خواهد کرد $(U = 0.0724 E)$.

- [11] Jia, Pengjiao, Wen Zhao, Arman Khoshghalb, Pengpeng Ni, Baofeng Jiang, Yang Chen, and Shengang Li. "A new model to predict ground surface settlement induced by jacked pipes with flanges." *Tunnelling and Underground Space Technology* 98 (2020): 103330.
- [12] Ren, Dong-Jie, Ye-Shuang Xu, Jack S. Shen, Annan Zhou, and Arul Arulrajah. "Prediction of ground deformation during pipe-jacking considering multiple factors." *Applied Sciences* 8, no. 7 (2018): 1051.
- [13] Ma, Wenjie, Binglong Wang, Xu Wang, Shunhua Zhou, and Bolin Wang. "Soil Layer Disturbance Caused by Pipe Jacking: Measurement and Simulation of a Case Study." *KSCE Journal of Civil Engineering* 25, no. 4 (2021): 1467-1478.
- [14] Cheng, L. Y., Samuel T. Ariaratnam, and S. X. Chen. "Analytical solution for predicting ground deformation associated with pipe jacking." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 8, no. 3 (2017): 04017008.
- [15] Stein D. "Trenchless technology for installation of cables and pipelines." Bochum, Germany: Stein & Partner; (2005) Sep.
- [16] Zhang, KunYong, Jose Luis Chavez Torres, and ZhenJun Zang. "Numerical analysis of pipelines settlement induced by tunneling." *Advances in Civil Engineering* 2019.
- [17] Han, Xianmin, Wenjiang Li, Tao Chen, and Wang Liu. "Sensitivity analysis of ground settlement induced by pipe-jacking construction in soft soil stratum." In *E3S Web of Conferences*, vol. 136, p. 04028. EDP Sciences, 2019.
- [18] Sterling, Raymond L. "Developments and research directions in pipe jacking and microtunneling." *Underground Space* 5, no. 1 (2020): 1-19.
- [19] Lv J, Li X, Li Z, Fu H. "Numerical simulations of construction of shield tunnel with small clearance to adjacent tunnel without and with isolation pile reinforcement." *KSCE Journal of Civil Engineering*. (2020) Jan;24(1):295-309.
- [3] Tarafrava, M., & Farrokh, E. (2023). Estimation of the stability number and face pressure of the tunnel at the serviceability limit state based on the results of numerical modeling. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 13(34), 27-39. (In Persian).
- [4] Ramezanzadeh, A., & Hojjati Tavandashti, A. (2021). Hydromechanical modeling of tunnel settlement in urban area-A case study, Tehran subway tunnel-line7. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 11(28), 85-100. (In Persian).
- [5] Javadi, M., Sayadi, S., Sharifzadeh, M., & Shahriar, K. (2020). Evaluation of Soil Constitutive Model Effects on Numerical Modeling of Settlement Induced by Tunneling in Urban Area, Case Study of the Amirkabir Tunnel. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 10(24), 119-136. (In Persian).
- [6] Bergeson, William. "Review of long drive microtunneling technology for use on large scale projects." *Tunnelling and underground space technology* 39 (2014): 66-72.
- [7] Niu, Zelin, Yun Cheng, Yuwei Zhang, Zhanping Song, Guiyang Yang, and Hui Li. "A new method for predicting ground settlement induced by pipe jacking construction." *Mathematical Problems in Engineering* 2020 .
- [8] Cheng, L. Y., Samuel T. Ariaratnam, and S. X. Chen. "Analytical solution for predicting ground deformation associated with pipe jacking." *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 8, no. 3 (2017): 04017008.
- [9] Fan, Haobo, Jinxing Lai, and Yuyang Liu. "Numerical simulation research of soil deformation caused by pipe jacking construction." *ICPTT 2014: Creating Infrastructure for a Sustainable World* (2014): 791-798.
- [10] Kalisz, Piotr, and Magdalena Zięba. "Influence of soil deformation caused by mining on sewage pipelines built using the pipe jacking method." *Studia Geotechnica et Mechanica* 40, no. 2.