

EXTENDED ABSTRACT

Investigating the Influence of the Effective Factors on the Lateral Displacement and Surface Uplift During the Tunneling Operation Using the Slurry Pipe Jacking Method

Reza Mohammadpour^a, Ehsan Taheri^{b,*}

^a Senior Student of Rock Mechanics, Faculty of Technical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

^b Assistant Professor, Faculty of Technical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 16 July 2022; Reviewed: 07 October 2022; Accepted: 12 November 2022

Keywords:

Slurry pipe jacking, Lateral displacement, Surface uplift, Sensitivity analysis.

1. Introduction

Trenchless technologies are mainly used for the construction of underground pipelines at deep depths, especially in urban areas. The pipe jacking method is a non-stop method in the construction of tunnels and underground channels.

Although this method has many advantages, there are significant problems in different types of soils that have highly variable geotechnical properties. In this paper, considering the pipe jacking operation in soft soil and below the underground water level as an engineering field, the ground deformation in different directions as well as the ground surface uplift were investigated using numerical simulation. This study has focused on the factors that mainly affect the displacement of the ground, including the diameter, over burden, grout injection pressure, excavation face pressure, elastic modulus, friction angle and cohesion. The aim of this research is to provide a theoretical basis for controlling and reducing the ground deformation during pipe jacking operations. Numerical simulation was carried out using Plaxis finite element numerical software and considering a case study. In the following, the effect of each parameter on the ground deformation in three directions and the estimation of the amount of uplift and their exact location were also investigated. The relationship of each of the parameters with the lateral ground displacement was estimated and finally the effect of each of the different factors was measured using sensitivity analysis and the sensitivity index of each was determined. The results show that the diameter has the most sensitivity and the grout injection pressure have the least sensitivity compared to other factors in the lateral ground displacement. Therefore, more precision and accuracy should be used in estimating them in primary studies. The maximum ground surface uplift occurs about 8 meters (2.4D) ahead of the excavation head and then gradually decreases as it approaches the excavated site.

2. Methodology

2.1. Case study

Vanjima and et al in 2021 analyzed a study of ground disturbance during pipe jacking operations in a field and theoretical. Their study was done in a field with seven layers, and the longitudinal profile of the layers and the pipeline are shown in Fig. 1.

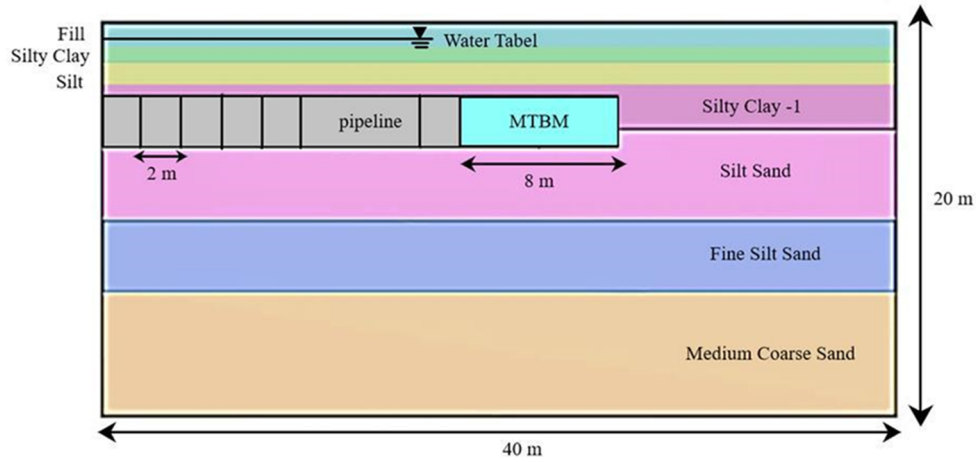


Fig. 1. The longitudinal profile of the ground and the position of the pipeline and layers

2.2. Plaxis finite element software

In this research, modeling was done using the 3D version of Plaxis finite element software, and the version used is the 2020 version of the software. One of the advantages of this version of the software is the use of a series of exploratory boreholes to define soil layering, which allows determining a non-horizontal soil stratification or a sloping ground surface. Also, this version of the software used fully automatic generation for finite element meshing.

2.3. Sensitivity analysis

The sensitivity function (S_k), which is a dimensionless quantity, is defined in the form of equation 1, that is, it will be equal to the ratio of the relative deviation ($\delta_p = |\Delta P/P^*|$) to the relative deviation of the parameter ($\delta_p = |\Delta \alpha_k/\alpha_k^*|$).

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

2.2. Boundary conditions

In defining the boundary conditions, the bottom of the model was considered as a rigid boundary, i.e., the displacement in all three directions was considered equal to zero, and the side boundaries were also fixed in the normal direction. The surface of the model also acts as a free surface to evaluate settlements and uplift during operations.

2.2. Grout injection pressure

The grout injection pressure behind the thrust pipes is also equal to 50KPa, which increases at the rate of 17 KPa per meter along the diameter. In this way, the slurry injection pressure in the lower part of the thrust pipes will be 105kPa.

2.2. Excavation face pressure

The excavation face pressure is equal to 116 KPa, which increases at the rate of 15KPa per meter along the diameter. In this way, the excavation face pressure in the lower part will be 165.5kPa.

3. Results and discussion

3.1. Lateral displacement contour

Fig. 2, 3 shows the longitudinal contour and transverse of the lateral ground displacement (u_y, u_x). The maximum amount of displacement is: ($u_y=17.16 \text{ mm}$), ($u_x=5.5 \text{ mm}$)

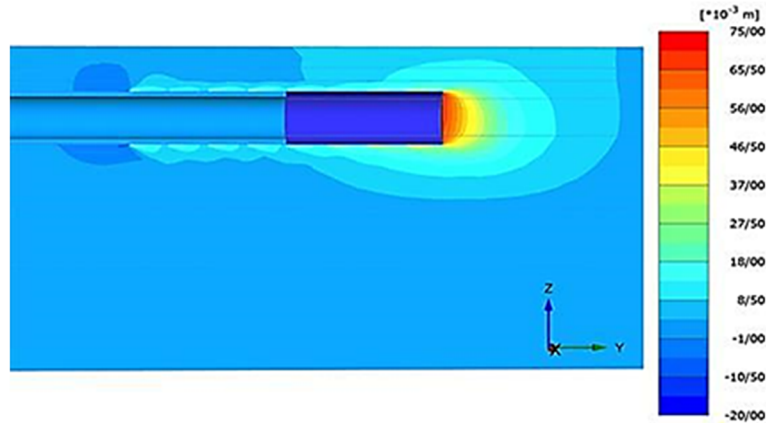


Fig. 2. Longitudinal contour of lateral displacement (u_y) of the numerical model

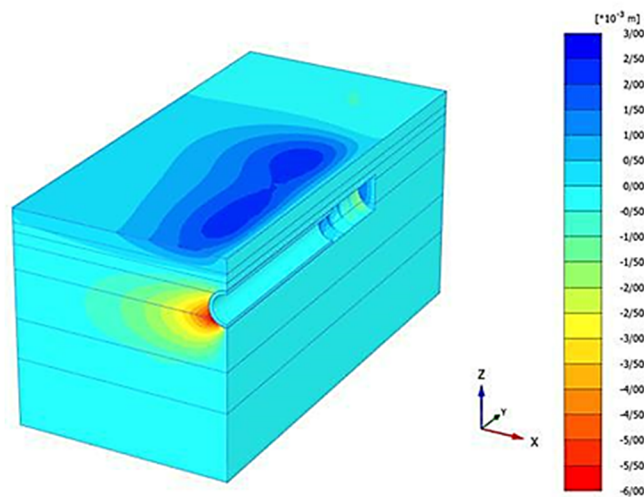


Fig. 3. transverse contour of lateral displacement (u_x) of the numerical model

3.2. calibration of the model

The comparison of the surface deformation of the ground in the form of transverse and longitudinal profiles of the measured values and the numerical model is shown in Fig. 4.

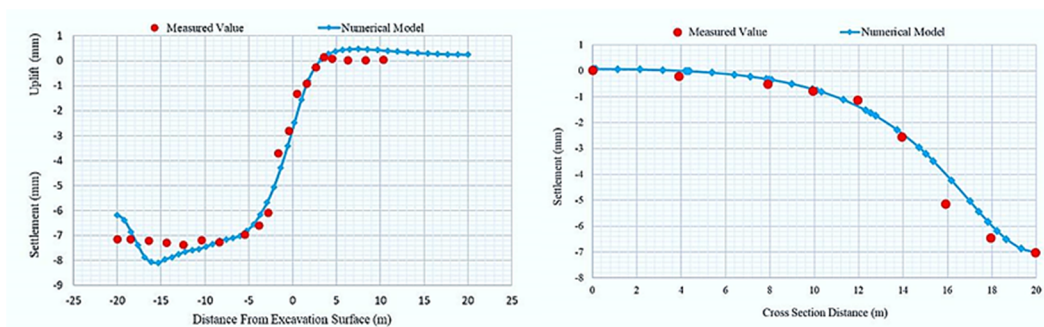


Fig. 4. Calibration of the model

3.3. calibration of the model

The relationships of each of the factors in the lateral displacement parallel to the pipeline (u_y) as well as their sensitivity function are given in Table 1.

Table 1. Lateral displacement relationships and sensitivity function of basic factors

Factor	(u_y)	(S_i)
Diameter	$U_y = -0.0098 d^3 + 0.606 d^2 - 0.898 d + 0.862$	$\frac{ -0.029 d^2 + 1.212 d - 0.898 \times d}{-0.0098 d^3 + 0.606 d^2 - 0.898 d + 0.862}$
Over burden	$U_y = -0.045 O^3 + 0.79 O^2 - 4.82 O + 12.378$	$\frac{ -0.135 O^2 + 1.58 O - 4.82 \times O}{-0.045 O^3 + 0.79 O^2 - 4.82 O + 12.378}$
Grout injection pressure	$U_y = -0.0044 G + 4.36$	$\frac{0.0044 G}{-0.0044 G + 4.36}$
Excavation face pressure	$U_y = 0.0582 P - 2.407$	$\frac{0.0582 P}{0.0582 P - 2.407}$
Elastic modulus	$U_y = -0.041 E + 4.232$	$\frac{0.041 E}{-0.041 E + 4.232}$
Friction angle	$U_y = 0.0095 \varphi + 4.148$	$\frac{0.0095 \varphi}{0.0095 \varphi + 4.148}$
Cohesion	$U_y = 0.0009 C^2 + 0.076 C + 4.15$	$\frac{ 0.018 C + 0.076 \times C}{0.0009 C^2 + 0.076 C + 4.15}$

3.4. Sensitivity index

Finally, the sensitivity index of the analyzed parameters is given in Fig. 5, which shows the importance of each factor in the lateral ground displacement.

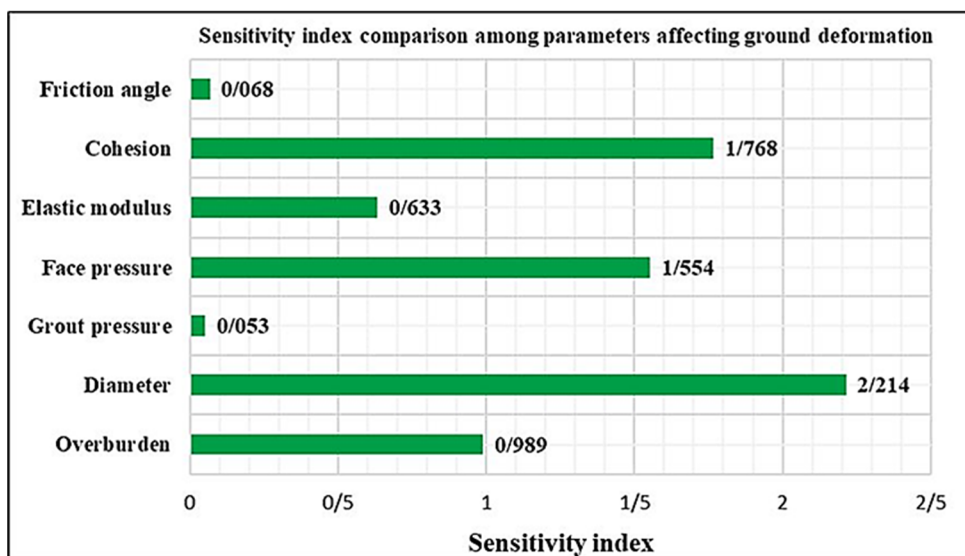


Fig. 5. Diagram of the sensitivity index of the effective parameters in lateral ground displacement

According to observations, the order of sensitivity and importance of the analyzed parameters will be as follows: (D > C > P > O > E > φ > G)

4. Conclusions

The effect of each parameter on the ground deformation in three directions, as well as the estimation of the amount of uplift and their exact location, was investigated. According to the results, the maximum uplift occurs about 8 meters (2.4 D) ahead of the excavation face, and then the uplift gradually decreases as it approaches the excavated site. By 3 times the injection pressure of slurry, the lateral displacement (u_x) has increased almost 14 times, and with the increase of 139.2 kPa excavation face pressure, an increase of 351.3% of the displacement in 1 meter in front of the excavation face will follow. Finally, the results showed that the sensitivity of the parameters is (D > C > P > O > E > φ > G) that the diameter has the most sensitivity and the grout injection pressure have the least sensitivity compared to other factors in the lateral ground displacement (u_y). Therefore, more precision and accuracy should be used in estimating them in primary studies

بررسی تأثیرپذیری عوامل مؤثر در جابه‌جایی جانبی و برآمدگی سطحی طی عملیات تونل‌زنی به‌روش لوله‌رانی دوغابی

رضا محمدپور¹، احسان طاهری^{2*}

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
² استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: 1401/4/25، بازنگری: 1401/7/15، پذیرش: 1401/8/21، نشر آنلاین: 1401/8/21

چکیده

در این مقاله، با در نظر گرفتن عملیات لوله‌رانی در خاک نرم و زیر سطح آب زیرزمینی به‌عنوان زمینه مهندسی، تغییر شکل زمین در راستای مختلف همچنین برآمدگی سطح زمین با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی شد. این مطالعه بر روی عواملی که عمدتاً بر جابه‌جایی زمین تأثیر دارد از جمله قطر فضای حفاری، عمق قرارگیری، فشار تزریق دوغاب، فشار صفحه حفاری، مدول کشسان خاک، زاویه اصطکاک و چسبندگی متمرکز بوده است. هدف از این پژوهش ارائه یک مبنای نظری جهت کنترل و کاهش تغییر شکل زمین طی عملیات لوله‌رانی می‌باشد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار عددی المان محدود پلکسیس (Plaxis) و با در نظر گرفتن مطالعه موردی انجام گرفت. در ادامه تأثیر هر یک از پارامترها در الگوی تغییر شکل زمین در سه راستا نیز تخمین میزان برآمدگی‌ها و محل دقیق آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. رابطه هر یک از پارامترها با جابه‌جایی جانبی زمین برآورد شد و در نهایت تأثیر هر یک از عوامل مختلف با استفاده از آنالیز حساسیت سنجیده شد و شاخص حساسیت هر کدام مشخص گردید. نتایج نشان می‌دهد که قطر فضای حفاری بیشترین حساسیت و فشار تزریق دوغاب کمترین حساسیت را نسبت به سایر متغیرها در جابه‌جایی جانبی زمین دارد. بنابراین بایستی دقت و صحت بیشتری در برآورد نمودن آن‌ها در مطالعات اولیه به‌کار گرفته شود. حداکثر برآمدگی سطح زمین حدود 8 متر به‌عبارتی (2.4D) جلوتر از سینه کار رخ می‌دهد و سپس به تدریج با نزدیک شدن به محل حفاری شده کاهش می‌یابد. با سه برابر شدن فشار تزریق دوغاب نیز جابه‌جایی جانبی (u_x) تقریباً 14 برابر خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: لوله‌رانی دوغابی، جابه‌جایی جانبی، برآمدگی سطحی، آنالیز حساسیت.

1- مقدمه

خطوط لوله آب، فاضلاب، برق و شبکه‌های گاز با استفاده از جک‌های هیدرولیکی کاربرد دارد. به‌عبارتی این روش برای نصب خطوط لوله‌های طولانی مناسب است (Cheng, 2017 و Fan, 2014). هر مرجعی که در متن آمده حتماً باید در انتهای مقاله نیز باشد

به‌علاوه لوله‌رانی بهترین گزینه برای نصب خطوط لوله زیرزمینی است زمانی که موانعی مانند بزرگراه، راه آهن، رودخانه، کانال‌ها و ساختمان‌ها در مسیر اجرای پروژه باشد (Kalisz, 2018). این تکنیک مزایای متعددی نسبت به روش‌های سنتی دارد و به‌طور کلی مناسب‌ترین روش برای مناطق شهری پرجمعیت است (Peila, 2001).

تکنولوژی‌های بدون ترانشه عمدتاً برای ساخت خطوط لوله زیرزمینی در اعماق زیاد به‌ویژه در مناطق شهری استفاده می‌شود. این تکنولوژی‌ها دارای مزایای منحصر به‌فردی از جمله حداقل نیاز به نیروی انسانی، نیاز به فضای محدود برای عملیات حفاری و عدم نیاز به ترانشه‌زنی هستند (Zięba و Kalisz, 2018).

لوله‌رانی بهترین روش فعلی برای نصب خطوط لوله زیرزمینی بدون حفر ترانشه می‌باشد و همچنین یک روش بدون وقفه در ساخت تونل‌ها و کانال‌های زیرزمینی به‌شمار می‌رود. این روش از طبقه روش‌های کنترل شده می‌باشد (Association, 2017). تکنیک لوله‌رانی برای نصب تأسیسات زیرزمینی از جمله



کاملاً متناسب است و حرکت لایه خاک عمدتاً به دلیل تخریب خاک حین عملیات حفاری می‌باشد. با فرض زهکشی نشدن و غیرمترکم بودن خاک، بایستی حجم جابه‌جایی خاک برابر با حجم تخریب خاک باشد (Peck, 1969).

مؤسسه عمومی طراحی مهندسی شانگهای، تونل برق واقع شده در شانگهای را با مسافت طولانی و قطر زیاد که یکی از سخت‌ترین پروژه زیرزمینی در چین است، مورد مطالعه قرار داد. تغییر شکل زمین با استفاده از روش المان محدود سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه فاکتورهای (کیفیت دوغاب تزریق شده، فشار خاک موجود در صفحه حفاری، فشار تزریق دوغاب و مقاومت زمین) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج مهمی که از این مطالعه به دست آمد بدین صورت بود که اگر تزریق دوغاب، خوب و به صورت مداوم انجام پذیرد، جابه‌جایی زمین در قسمت انحنای خط لوله بزرگتر از قسمت مستقیم نخواهد بود. همچنین به دلیل مقاومت اضافی در زمین، حداکثر تغییر شکل زمین عمود بر محور لوله و نزدیک مرکز خط لوله قرار دارد و مقدار جابه‌جایی به شعاع انحنای خط لوله بستگی دارد (You, 2008).

Han و همکارانش در سال 2019 با در نظر گرفتن نشست زمین در حین عملیات لوله‌رانی در خاک نرم به عنوان زمینه 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 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 (Han, 2019; Sterling, 2020).

Ma و همکاران در سال 2021، 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 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 آن‌ها نشان داد که هرچه به محور خط لوله نزدیک شویم اضافه تنش بیشتر خواهد بود، سرعت میرایی سریع‌تر است و دامنه تأثیر نیز کمتر می‌باشد. دامنه اصلی نفوذ حدود $\pm D$ و عرض جابه‌جایی زمین حدود D است و حداکثر جابه‌جایی مستقماً 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. محاسبات نظری، اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی عددی، همگی

اگرچه این روش دارای مزایای بسیاری است، اما در انواع مختلف خاک‌ها که دارای ویژگی‌های ژئوتکنیکی بسیار متغیری هستند، مشکلات قابل توجهی وجود دارد (Descoedres, 1993; Site-based, 1996; Shou K, 2006).

حرکات زمین ناشی از لوله‌رانی باعث جابه‌جایی خط لوله می‌شود که ممکن است انتقال خدمات و منابع ضروری (به عنوان مثال آب، گاز، برق و ارتباطات از راه دور) را مختل کند و امنیت ساکنان شهری را تهدید کند. بنابراین فعل و انفعالات بین خطوط لوله زیرزمینی و خاک اطراف اخیراً مورد توجه تحقیقات قرار گرفته است. کارهای قابل توجهی در مورد تأثیر ساخت تونل در خطوط لوله زیرزمینی مجاور انجام شده است (Wang, 2011; Shi, 2013; Ng, 2015).

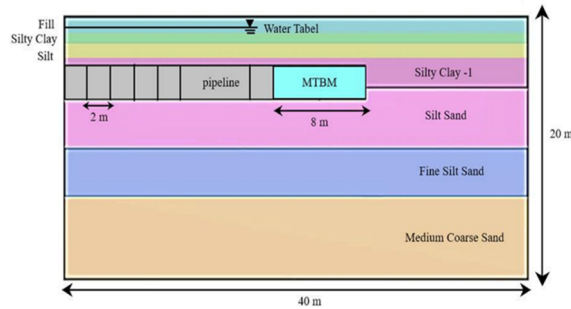
اگر روند ساخت به درستی کنترل نشود از مقاومت و مدول تغییر شکل‌پذیری خاک تا حد زیادی کاسته شده که می‌تواند منجر به مشکلات برآمدگی و نشست سطح زمین و در نتیجه ترک برداشتن ساختمان‌ها، فروریختن تأسیسات سطحی و شکستگی خطوط لوله مجاور شود (Ma, 2021). بنابراین پیش‌بینی تغییر شکل زمین طی عملیات لوله‌رانی و راهکارهای کاهش آن، امری ضروری است.

تحولات منتهی به حفاری مدرن دستگاه لوله‌رانی عمدتاً در ژاپن، آلمان و انگلیس رخ داده است (Sterling, 2020). مفهوم سپر تعادل فشار دوغاب، در اواخر قرن نوزدهم در انگلستان و آلمان ارائه شد. حق ثبت اختراع ماشین‌آلات دوغابی در انگلستان در سال 1964 به جان بارتلت اعطا شد، اگرچه در اولین استفاده آزمایشی ثبت اختراع در تونل آزمایشی نیوکراس در جنوب لندن در سال 1971 مشکلاتی وجود داشت (Thomson, 2009; Biggart, 2011).

ژاپن نیز آزمایش‌های خود را با «سپر دوغاب» در سال 1964 در آبرفت‌های ساحلی بسیار نرم آغاز کرد و در آلمان آزمایش‌ها در سال 1976 با استفاده از "هیدروشیلد" در هامبورگ انجام شد (Sterling, 2020).

در اوایل دهه 1980، به دنبال برنامه موفقیت‌آمیز لوله‌رانی در هامبورگ، صنعت آلمان فعالیت‌ها را توسعه داد و دستگاه‌های میکروتونل خود را تولید کرد. اولین پروژه لوله‌رانی در آمریکا در سال 1984 اتفاق افتاد که در آن از سه نوع اصلی نگهداری از صفحه حفاری علاوه بر هوای فشرده استفاده شد (Thomson, 2009).

Peck در سال 1969، تغییر شکل خاک در حین عملیات لوله‌رانی را مورد مطالعه قرار داد. وی نمونه‌ای بزرگ از داده‌های پروژه‌های مختلف را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. البته لازم به ذکر است که پک روند ساخت واقعی را در نظر نگرفته و فقط چند فاکتور تأثیرگذار را لحاظ کرد. در نهایت به این نتیجه رسید که جابه‌جایی زمین با یک توزیع شبه احتمال (quasi probability)



شکل 1- پروفیل طولی زمین و موقعیت خط لوله و لایه‌ها

2-2- مشخصات لایه‌بندی

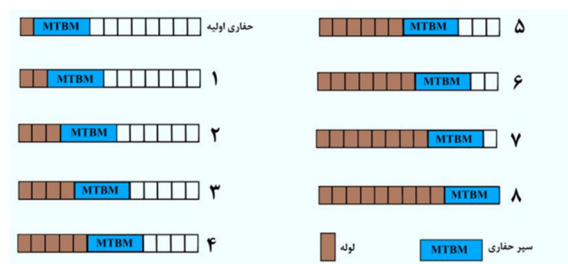
مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه بندی با توجه به این که از معیار شکست موهر کلمب استفاده شده است در شکل (2) آورده شده است. لازم به ذکر است این پارامترها در پایش میدانی برآورد شده است.

Borehole		characteristics					
		$\gamma (kN/m^3)$	E (Mpa)	C (kPa)	ν	ϕ	w (%)
0	Fill	18/5	7/5	7	0/33	5	32/4
2	B Silty Clay	20	12/03	20/6	0/35	21/5	38/9
4	C Silt	19/9	10/23	10	0/35	21/5	34/5
4	D Silty Clay -1	19/6	12/3	23	0/32	15/9	36/8
6	E Silt Sand	20/3	5/6	3/6	0/3	32	28/9
8	F Fine Silt Sand	18/5	18	3	0/27	20	29/5
10							
12							
14							
16	G Medium Coarse Sand	18/9	40	2	0/27	28	27/6
18							
20							

شکل 2- لایه‌بندی خاک و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن

2-3- مراحل حفاری

در این مطالعه هشت گام حفاری با طول 2 متر که طول حلقه لوله‌ها می‌باشد در نظر گرفته شد. مقدار حفاری اولیه 10 متر لحاظ گردید که موقعیت سپر حفاری در این گام در طول 10 متری خط لوله قرار گرفت. با توجه به شکل (3) مراحل و گام‌های حفاری در مشخص می‌باشد.



شکل 3- موقعیت سپر حفاری و لوله‌ها در گام‌های پیشروی

نشست در محوطه تقریباً D در مقابل صفحه حفاری را برآورد می‌کنند. با عبور دستگاه حفاری، در حالت کلی فضای حفر شده تمایل به پایداری دارد و نشست کل حدود 8 متر پایدار است (Ma, 2021).

الگوی تغییر شکل زمین در سه راستا در زمین لایه‌ای و بر اساس شبیه‌سازی عددی المان محدود موضوعی است که مطالعات محدودی در این زمینه انجام شده است. در این تحقیق، جزئیات مدل‌سازی از جمله اجازه رهایی تنش، راندمان افزایشی فشار تزریق دوغاب و فشار صفحه حفاری در نظر گرفته شده است تا نزدیک به حالت واقعی بوده باشد. لازم به ذکر است مقادیر جابه‌جایی در سه جهت، در سطح زمین و تاج خط لوله مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

در این مطالعه به بررسی تأثیرپذیری فاکتورهای اساسی در تغییر شکل جانبی و برآمدگی سطح زمین طی عملیات لوله‌رانی دوغابی پرداخته شده است که مورد توجه نبوده است. در گام بعد روابط هر یک از فاکتورهای مؤثر در تغییر شکل زمین برآورد شده و در نهایت آنالیز حساسیت بر روی هر یک از پارامترها انجام گرفته و شاخص حساسیت هر کدام مشخص شد. شاخص حساسیت نشان‌دهنده اهمیت پارامتر در تغییر شکل زمین است. از آنجا که قرار بود در این مطالعه تجزیه و تحلیل‌ها در بعدهای مختلف مورد بررسی شود. بنابراین از نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار پلکسیس ورژن 2020 جهت مدل‌سازی انتخاب شد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مطالعه موردی

Ma و همکاران در سال 2021 مطالعه‌ای مبنی بر اغتشاش زمین در طول عملیات لوله‌رانی به صورت میدانی و نظری مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. مطالعه آن‌ها در زمینی با هفت لایه انجام شد که پروفیل طولی لایه‌ها و خط لوله در شکل (1) آورده شده است.

با توجه به شکل خط لوله زیر سطح آب زیرزمینی و در عمق 4/4 متری قرار دارد. به علت این که خط لوله در خاک نرم و زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد بنابراین بهترین گزینه استفاده از ماشین حفاری متعادل‌کننده فشار مین (EPB) می‌باشد. فشار دوغاب‌های تزریق شده پشت لوله‌ها 50 کیلوپاسکال بوده و در راستای قطر افزایشی دارد تا وزن دوغاب و لوله‌ها نیز لحاظ شود. فشار صفحه حفاری 116 کیلوپاسکال می‌باشد که با توجه به فشار زمین و فشار هیدرواستاتیکی در نظر گرفته شد. فشار جک‌ها نیز با توجه به مطالعه میدانی انجام شده برابر 15/0 مگاپاسکال می‌باشد.

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

$$= \frac{|\Delta P|}{|\Delta a|} \frac{\alpha_k^*}{P^*}$$

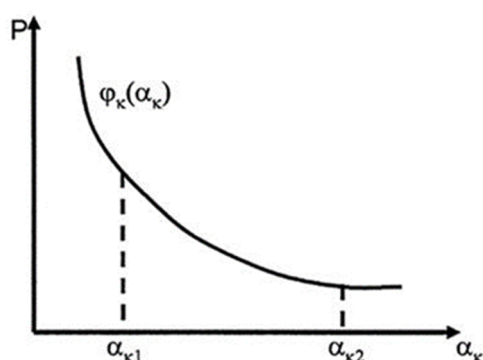
در رابطه (2) اگر مقدار کمیت $|\Delta \alpha_k / \alpha_k^*|$ دارای مقادیر اندک باشد، رابطه $S_k(\alpha)$ را می‌توان به صورت زیر لحاظ کرد:

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

با قراردادن پارامتر α_k^* برابر α_k فاکتور حساسیت (S_k^*) پارامتر α_k مطابق رابطه (3) خواهد شد. لازم به ذکر است α_k متغیر بررسی شده می‌باشد (مثل E که مدول کشسان می‌باشد). α_k^* کمیت پارامتر بررسی شده در حالت مرجع و پایه است (مثلاً برای مدول کشسان پنج حالت بررسی شده که حالت پایه آن مد نظر است). S_k^* فاکتور حساسیت است که بدون بعد می‌باشد. روابط پارامترهای بررسی شده با استفاده از رابطه (2) که تابع حساسیت (S_k) می‌باشد، بدون بعد می‌شود. P نیز متغیری است که تأثیر پارامترها در آن متغیر بررسی می‌شود که در این مطالعه نشست سطح زمین می‌باشد.

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

در روابط فوق، K شامل اعداد مثبت است $K=(1,2,3,\dots,n)$ و هرچقدر S_k کمیت بالایی داشته باشد، P نسبت به پارامتر α حساس‌تر خواهد بود. سیستم منحنی $(\alpha_k - P)$ و تابع حساسیت $(S_k - \alpha_k)$ با توجه به روابط ارائه شده، مطابق شکل (5) و (6) خواهد بود (Zhao, 2003).



شکل 5- سیستم منحنی $(\alpha_k - P)$ (Zhao, 2003)

2-4- نرم‌افزار المان محدود پلکسیس

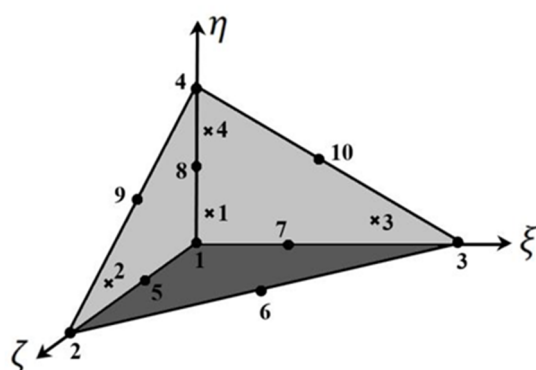
در این پژوهش مدل‌سازی با استفاده از نسخه سه‌بعدی نرم‌افزار المان محدود پلکسیس صورت گرفته و ورژنی که استفاده شده ورژن 2020 نرم‌افزار است. از قابلیت‌های مهم ورژن 2020 این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- 1) امکان مدل‌سازی سازه‌های سطحی و زیرسطحی در محیط‌های خاکی و سنگی
- 2) تحلیل مسائل به‌روشنی‌های استاتیکی و دینامیکی
- 3) مدل‌سازی تراوش و تحلیل دوگانه فشار آب- تغییر شکل
- 4) ارائه خروجی‌های قدرتمند

از مزیت‌هایی که این نسخه از نرم‌افزار دارد، استفاده از یک‌سری گمانه‌های اکتشافی جهت تعریف لایه‌بندی خاک است که امکان تعیین یک چین‌نگاری غیرافقی خاک یا یک سطح زمین مایل فراهم می‌کند. همچنین این نسخه از نرم‌افزار از نسل کاملاً خودکار برای مش‌زنی المان محدود استفاده می‌کند.

2-5- نوع المان‌ها

زمانی که هندسه مدل کاملاً مشخص شد، پروژه برای انجام محاسبات اجزای محدود باید مش‌بندی شود. مش‌ها باید به‌اندازه کافی ریز باشد تا نتایج عددی دقیق به‌دست آید. از طرف دیگر، باید از ایجاد مش‌های بسیار ریز هم خودداری کرد زیرا این امر منجر به زمان محاسبه بیش‌ازحد خواهد شد. المان‌های اساسی خاک همان‌طور که در مشاهده می‌شود به‌صورت سه‌بعدی و چهارضلعی (چهاروجهی) و به‌صورت 10 گرهی هستند برای صفحات و ژئوگریدها نیز از المان‌های 6 گرهی استفاده می‌شود.



شکل 4- المان چهاروجهی 10 گرهی

2-6- تحلیل حساسیت

تابع حساسیت (S_k) که کمیتی بی‌بعد است، به‌صورت رابطه (1) تعریف می‌شود. یعنی برابر نسبت انحراف نسبی $(\delta_p = |\Delta P / P^*|)$ به انحراف نسبی پارامتر $(\delta_a = |\Delta \alpha_k / \alpha_k^*|)$ خواهد بود.

10-2- فشار صفحه حفاری

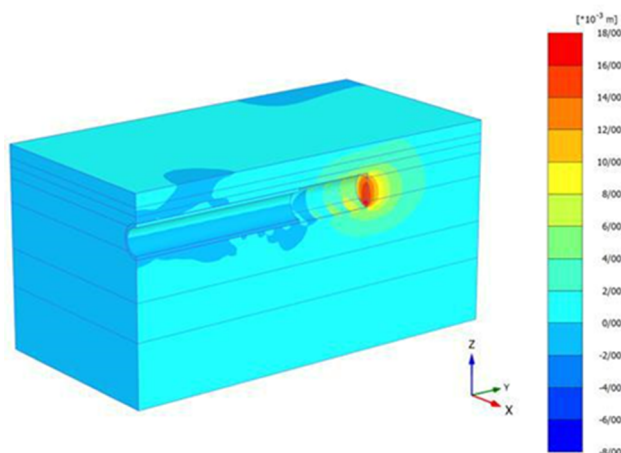
فشار صفحه حفاری برابر 116 کیلوپاسکال است که با نرخ 15 کیلوپاسکال به ازای هر متر در راستای قطر افزایش می‌یابد. بدین ترتیب فشار صفحه حفاری در قسمت پایین 165/5 کیلوپاسکال خواهد بود.

لازم به ذکر است در مدل عددی فشار صفحه حفاری به صورت بار سطحی خارجی و عمود بر سطح اعمال شد. گرادیان افزایشی در راستای عمق نیز بدین صورت 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 به صورت استاتیکی تحلیل شد.

3- بحث و بررسی

3-1- کانتور جابه‌جایی جانبی

با دقت در شکل (7)، می‌توان دریافت که ترکیب فشار صفحه حفاری و نیروی رانش منجر به حرکت خاک در راستای پیشروی خط لوله شده و در نهایت تورم و برآمدگی سطح زمین را در پی خواهد داشت. نرخ افزایشی فشار صفحه حفاری در امتداد قطر (از بالا به پایین) و همچنین یکنواختی نیروی رانش در سراسر محیط لوله باعث می‌شود که حداکثر جابه‌جایی در قسمت کف جبهه کار رخ دهد. بنابراین مقدار بیشینه جابه‌جایی که در گام اول حفاری ایجاد شده 17/16 میلی‌متر است.



شکل 7- جابه‌جایی جانبی (u_y) در جهت پیشروی خط لوله در گام هشتم حفاری

شکل (8) کانتور طولی جابه‌جایی جانبی زمین (u_y) را نشان می‌دهد که در آن میزان پیشروی سپر حفاری 26 متر می‌باشد. مقطع عرضی در فاصله 1 متر مقابل جبهه کار زده شده تا بررسی با دقت بیش‌تر صورت گیرد.



شکل 6- سیستم منحنی ($\alpha_k - S_k$) (Zhao, 2003)

7-2- اندرکنش

اندرکنش بین خاک اطراف و سازه‌های زیرزمینی همیشه برقرار است. المان‌های اندرکنش اصولاً در نقاطی از خاک مورد نظر که سازه‌های احداث شده است. مقاومت و پارامترهای خاک از حالت بکر خارج شده و اصطلاحاً به حالت دست‌خورده وارد می‌شود. یک‌سری سطح تماس‌ها مثل سطح تماس بتن با خاک یا سطح تماس سپر با خاک، می‌تواند پارامترهای مقاومتی خاک را کاهش دهد.

در نرم‌افزار المان محدود پلکسیس، ضریب R (کوچک‌تر از 1) تعریف می‌شود که طبق راهنمای کاربردی نرم‌افزار برابر است. این ضریب در پارامترهای مکانیکی خاک یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ضرب شده و در نهایت مقدار تعدیل یافته‌ای از این پارامترهای مقاومتی خاک ارائه می‌شود.

8-2- شرایط مرزی

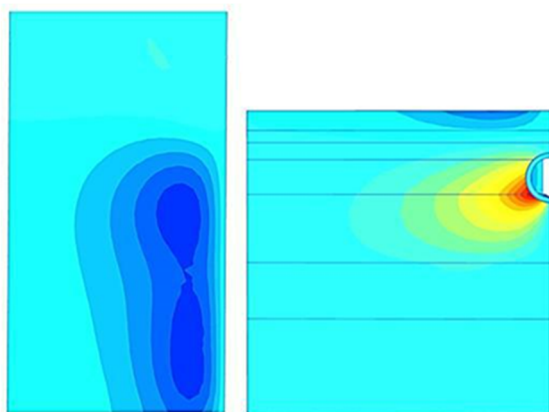
در تعریف شرایط مرزی کف مدل به صورت مرز صلب یعنی جابه‌جایی در هر سه جهت برابر صفر در نظر گرفته شد و مرزهای کناری نیز در جهت نرمال بسته شد. سطح مدل هم به صورت سطح آزاد عمل می‌کند تا طی عملیات، نشست‌ها و برآمدگی‌ها ارزیابی شود.

9-2- فشار تزریق دوغاب

فشار تزریق دوغاب پشت لوله‌های رانش نیز برابر 50 کیلوپاسکال است که با نرخ 17 کیلوپاسکال به ازای هر متر در راستای قطر افزایش می‌یابد. بدین ترتیب فشار تزریق دوغاب در قسمت پایین لوله‌های رانش 105 کیلوپاسکال خواهد بود.

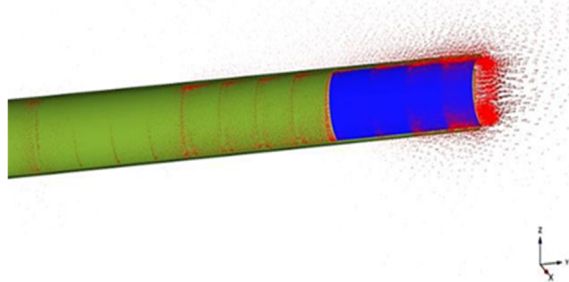
فشار تزریق دوغاب نیز به صورت بار سطحی خارجی و عمود بر سطح تعریف شد. گرادیان افزایشی در راستای عمق نیز همانند فشار صفحه حفاری با تعیین نقطه مرجع در قسمت تاج خط لوله تعریف شد.

قسمت ابتدایی خط لوله به علت این که در کمترین فاصله نسبت به جک‌های هیدرولیکی قرار دارد بنابراین نیروی رانش حداکثر میزان را داشته و همچنین فشار تزریق دوغاب نسبت به سایر بخش‌های خط لوله دارای مقدار بیشینه است. در نتیجه جابه‌جایی جانبی نیز دارای بیشترین مقدار خواهد بود. تزریق دوغاب به صورت پیوسته در خط لوله صورت می‌گیرد پس قسمت ابتدایی خط لوله فشار تزریق بیشتری را متحمل خواهد شد. حداکثر تغییر شکل جانبی (u_x) در سطح زمین نیز در فاصله 4 متری از محور مرکزی خط لوله رخ می‌دهد و با فاصله از خط لوله مقدار آن کاهش می‌یابد. شکل (11) نیز این امر را تأیید می‌کند.

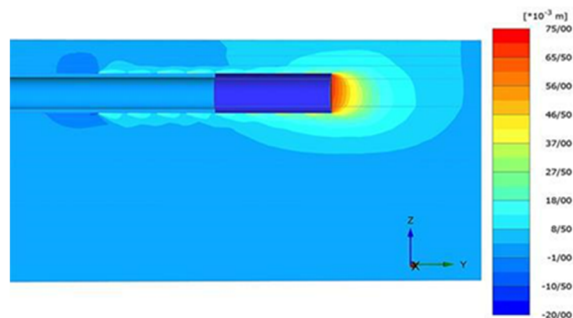


شکل 11- کانتور تغییر شکل جانبی (u_x) در امتداد طولی و عرضی

شکل (12) میزان حرکت خاک در طول خط لوله را نشان می‌دهد که مقدار آن در صفحه حفاری دارای کمیت بیشینه است. با توجه به شکل می‌توان دریافت که مقداری از خاک طی عملیات رانش لوله‌ها همراه خط لوله جابه‌جا می‌شود. لازم به ذکر است که دوغاب تزریق شده پشت لوله‌ها چون اصطکاک بین خط لوله و خاک اطراف را کاهش می‌دهد. لذا مقدار جابه‌جایی در راستای حرکت خط لوله نیز به صورت چشمگیری کاسته می‌شود.

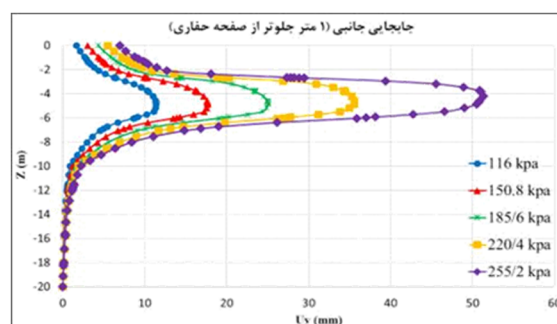


شکل 12- حرکت خاک در راستای خط لوله



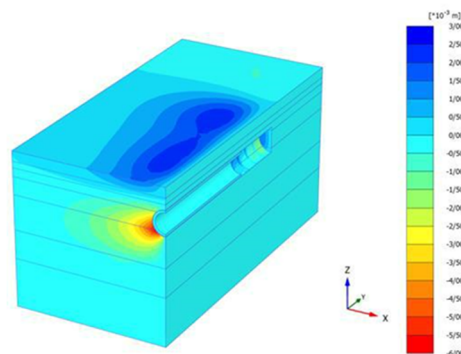
شکل 8- کانتور طولی جابه‌جایی جانبی (u_x) مدل عددی

شکل (9) نیز قسمت جلوی سینه کار را به صورت مقطعی و نموداری نشان می‌دهد. به‌طور کلی فشار صفحه حفاری منجر به حرکت خاک در راستای پیشروی خط لوله می‌شود.



شکل 9- جابه‌جایی جانبی (u_x) در پیشروی 26 متری سپر

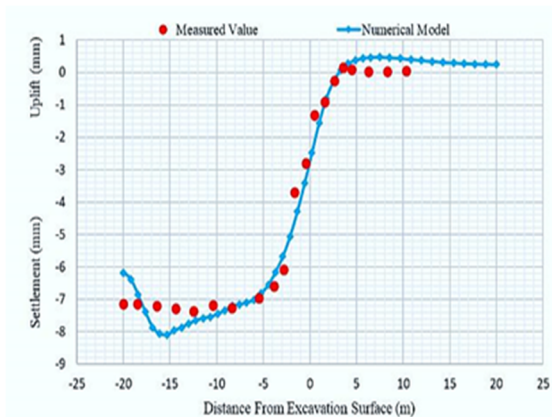
همان‌طور که در شکل (10) ملاحظه می‌شود، مقدار بیشینه جابه‌جایی جانبی (u_x) در سطح بیرونی لوله رانش رخ می‌دهد و مقدار آن برابر 5/5 میلی‌متر است. البته علت این امر فشار زیاد تزریق دوغاب پشت لوله‌های رانش می‌باشد. با جابه‌جا شدن خاک اطراف لوله رانش در جهت منفی محور X یعنی به صورت گریز از محور خط لوله، خاک سطح زمین به سمت خط لوله جابه‌جا خواهد شد. البته با فاصله گرفتن از خط لوله، مقدار این جابه‌جایی کاهش پیدا می‌کند.



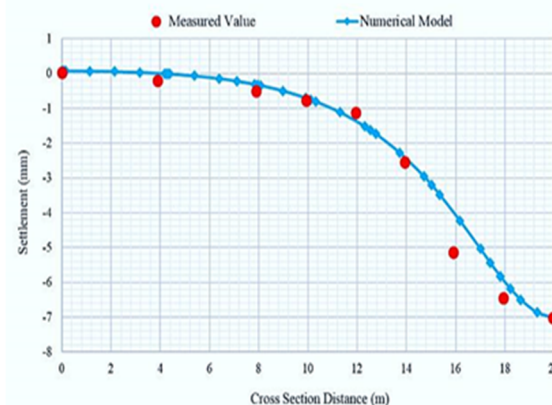
شکل 10- جابه‌جایی جانبی (u_x) عمود بر محور خط لوله بعد از گام هشتم حفاری

3-2- صحت‌سنجی مدل

مقایسه تغییر شکل سطحی زمین به‌صورت پروفیل عرضی و طولی مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل عددی در شکل (13) آورده شده است. با توجه به این‌که در مطالعات میدانی سنجش‌گرها در فاصله شش متری پشت سپر حفاری عملیات اندازه‌گیری را انجام داده‌اند، مقادیر نظری و مدل‌سازی عددی نیز در همان فاصله مورد بررسی قرار گرفت.



(الف)



(ب)

شکل 13- صحت‌سنجی منحنی جابه‌جایی: الف) طولی،

ب) عرضی

3-3- برآمدگی سطح زمین

مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی عددی تا حد زیادی مشابه هستند. خاک جلوی دستگاه حفاری عمدتاً تحت نیروی مثبت رانش قرار می‌گیرد. بنابراین مقدار مشخصی برآمدگی اتفاق خواهد افتاد. حداکثر برآمدگی حدود 8 متر به‌عبارتی (2.4D) در مقابل صفحه حفاری رخ می‌دهد و سپس به تدریج میزان برآمدگی با نزدیک شدن به محل حفاری شده کاهش می‌یابد. عملکرد ترکیبی نیروی پیشران مثبت و فشار صفحه حفاری، برآمدگی سطح را در پی خواهد داشت. البته پتانسیل تورم‌پذیری خاک با

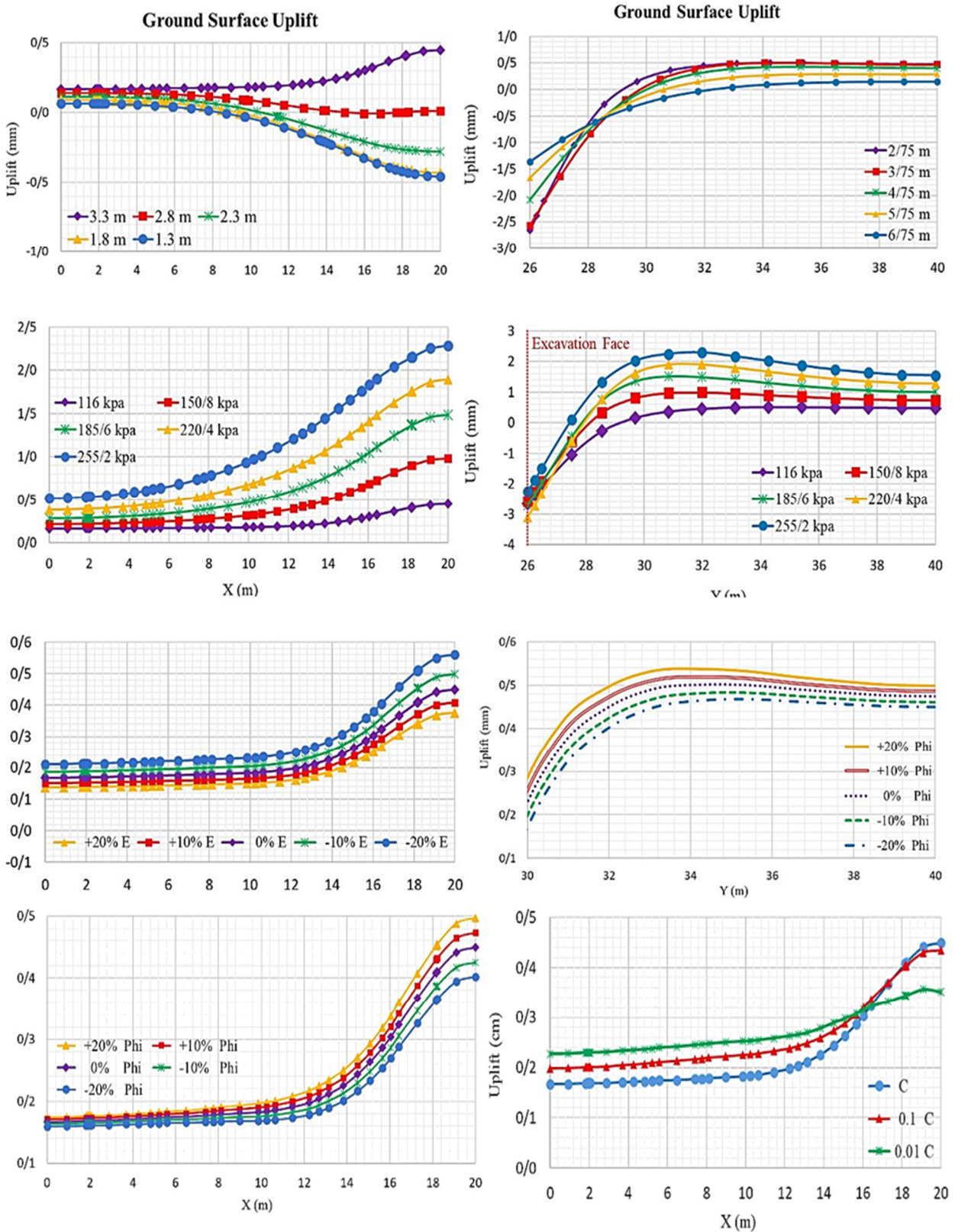
خاصیت خمیری زیاد نیز یکی از دلایل مهم در برآمدگی سطح می‌باشد. شکل (14) تأثیر هر یک فاکتورهای اساسی را در میزان برآمدگی سطح زمین در قسمت جلوی سینه کار نشان می‌دهد.

3-4- جابه‌جایی جانبی عمود بر محور خط لوله

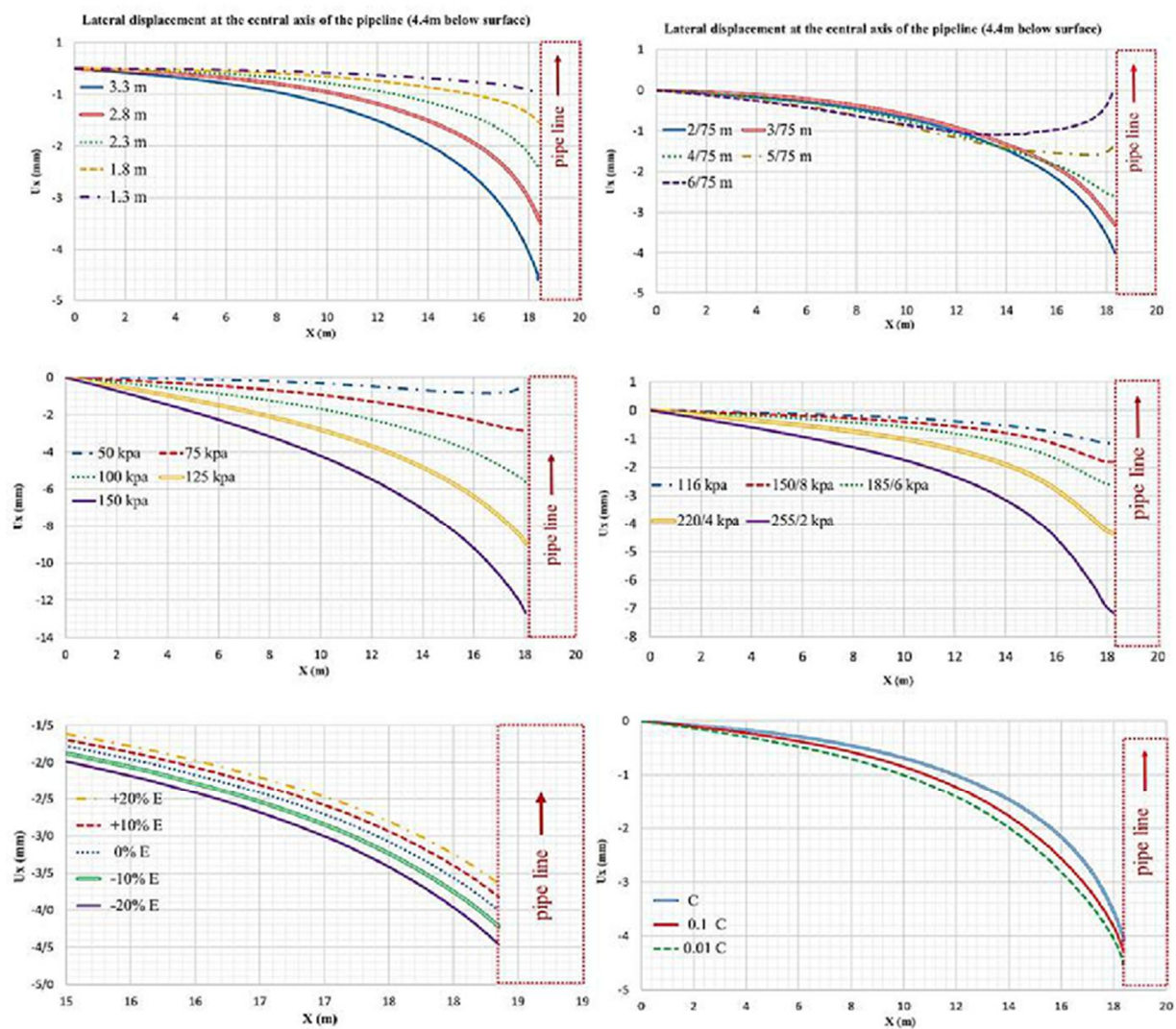
مطابق با شکل (15)، تغییر شکل جانبی خاک در راستای عمود بر عمود بر محور طولی خط لوله (در امتداد محور X) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و تأثیر هر یک از فاکتورها مشخص شد. طبق نتایج بیشترین جابه‌جایی جانبی در قسمت ابتدایی خط لوله به دلیل فشار تزریق دوغاب و نیروی رانش ایجاد می‌شود. با توجه به این‌که فشار تزریق دوغاب در خلاف جهت محور X اعمال می‌شود بنابراین جابه‌جایی خاک در همین راستا خواهد بود.

افزایش مقدار روباره، منجر به کاهش جابه‌جایی جانبی می‌شود. به‌عبارتی زمانی که خط لوله نزدیک سطح زمین قرار دارد جابه‌جایی بیشتر نمود پیدا می‌کند. دلیل حداکثر بودن جابه‌جایی جانبی در قسمت ابتدایی خط لوله، نیروی رانش حداکثر که در کمترین فاصله نسبت به جک‌های هیدرولیکی قرار دارد و به تبع آن اصطکاک حداکثر و همچنین بیشترین فشار تزریق دوغاب نسبت به سایر بخش‌های خط لوله می‌باشد. تزریق دوغاب به‌صورت پیوسته در خط لوله صورت می‌گیرد پس قسمت ابتدایی خط لوله فشار تزریق بیشتری را متحمل خواهد شد. با افزایش قطر لوله، جابه‌جایی جانبی بیش‌تر می‌شود. با افزایش قطر لوله، فشار تزریق دوغاب سطح وسیعی را دربر می‌گیرد و همچنین اصطکاک و اندرکنش بین لوله رانش و خاک بیش‌تر شده که در نهایت منجر به افزایش جابه‌جایی خواهد شد.

هرچقدر فشار تزریق دوغاب بیشتر باشد، خاک اطراف در جهت عمود بر محور لوله بیش‌تر جابه‌جا خواهد شد. در فشار تزریق 50 کیلوپاسکال، حداکثر جابه‌جایی 0/86 میلی‌متر بوده و با افزایش آن تا 150 کیلوپاسکال، حداکثر جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد و برابر 12/68 میلی‌متر می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اگر فشار تزریق دوغاب 3 برابر شود، جابه‌جایی جانبی (u_x) تقریباً 14 برابر خواهد شد. شکل (16) مقطع طولی جابه‌جایی جانبی (u_x) را در محور مرکزی خط لوله و دارای مقدار بیشینه فشار تزریق 150 کیلوپاسکال به‌صورت کانتوری نمایش می‌دهد و نتایج را تأیید می‌کند.



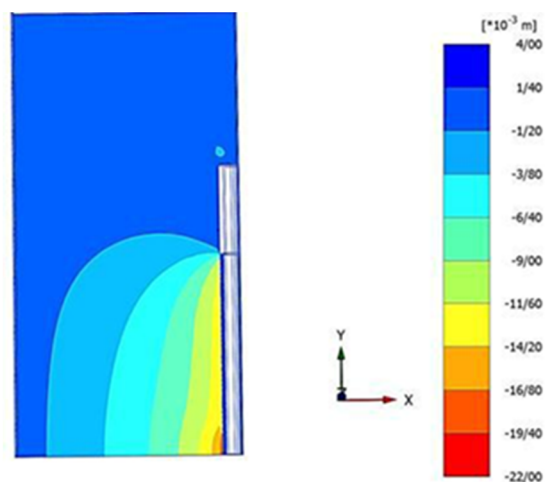
شکل 14- تأثیر فاکتورهای اساسی در برآمدگی سطح زمین در 6 متری جلوی سینه کار



شکل 15- تأثیر فاکتورهای اساسی در جابه‌جایی جانبی عمود بر محور خط لوله (در محور مرکزی و عمق 4/4 متر)

طبق نتایج، افزایش 120٪ فشار صفحه حفاری، سبب افزایش 517٪ تغییر شکل جانبی شده است به عبارت بهتر، تغییر شکل جانبی 3/3 برابر می‌شود.

با توجه به شکل (17)، در قسمت جلوی سپر حفاری یعنی محدودهای که هنوز حفاری صورت نگرفته، تحت تأثیر فشار صفحه حفاری، برآمدگی سطح را به دنبال داشته و از طرف دیگر نیز منجر به جابه‌جایی جانبی خاک (u_x) به صورت گریز از خط لوله می‌شود. در قسمت پشت سپر حفاری نیز چون حفاری صورت گرفته و نشست داریم، جابه‌جایی جانبی خاک (u_x) به سمت خط لوله خواهد بود.



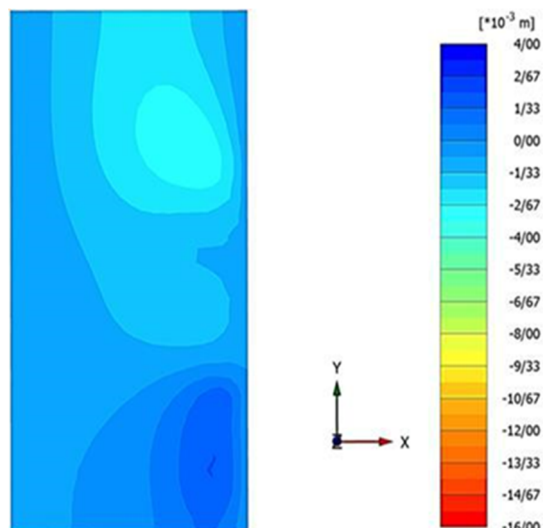
شکل 16- مقطع طولی جابه‌جایی (u_x) در عمق 4/4 متری و فشار تزریق 150 کیلوپاسکال

سینه کار را به دنبال خواهد داشت. افزایش مدول کشسان باعث افزایش سختی خاک شده و در نهایت کاهش جابه‌جایی جانبی خاک اطراف در جهت پیشروی خط لوله را به دنبال خواهد داشت. بیشترین جابه‌جایی مربوط به کاهش 20٪ مدول کشسان است و مقدار آن 5/15 میلی‌متر می‌باشد. کمترین جابه‌جایی نیز مربوط به افزایش 20٪ مدول کشسان است و مقدار آن 3/48 میلی‌متر می‌باشد. به عبارتی افزایش 40٪ مدول کشسان باعث کاهش 48٪ جابه‌جایی جانبی (u_y) می‌شود.

افزایش چسبندگی منجر به کاهش جابه‌جایی جانبی (u_y) خواهد شد. در حالتی که چسبندگی در کمترین مقدار خود (0.01C) قرار دارد، خاک مقاومت برشی کمتری داشته و منجر به تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود.

طبق مشاهدات در بیشترین مقدار چسبندگی (C)، حداکثر جابه‌جایی جانبی 4/15 میلی‌متر بوده و در کمترین مقدار چسبندگی (0.01C)، حداکثر جابه‌جایی به 5/37 میلی‌متر رسیده است. می‌توان نتیجه گرفت با افزایش 99٪ چسبندگی، جابه‌جایی جانبی 29/4٪ کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که این جابه‌جایی‌ها در جبهه کار به وقوع می‌پیوندند.

نتایج نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌ها در سه راستای (X, Y, Z) با افزایش زاویه اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد. البته مقادیر تغییرات ناچیز بوده و از حساسیت کمتری برخوردار است. روابط هر یک از فاکتورها در جابه‌جایی جانبی به موازات خط لوله (u_y) و همچنین تابع حساسیت آن‌ها در جدول (1) آورده شده است. با قرار دادن مقادیر مختلف فاکتورهای بررسی شده در روابط تابع حساسیت، مطابق شکل (19) منحنی تابع حساسیت در شرایط مختلف به دست خواهد آمد. تابع حساسیت یک تابع بی‌بعد بوده که با در نظر گرفتن مقدار متغیر یک کمیت عددی را در اختیار ما قرار می‌دهند. با قرار دادن مقدار پایه در رابطه تابع حساسیت، شاخص حساسیت (S_i) به دست می‌آید.



شکل 17- کانتور جابه‌جایی جانبی (u_y) در پیشروی 26 متری سپر و در سطح زمین

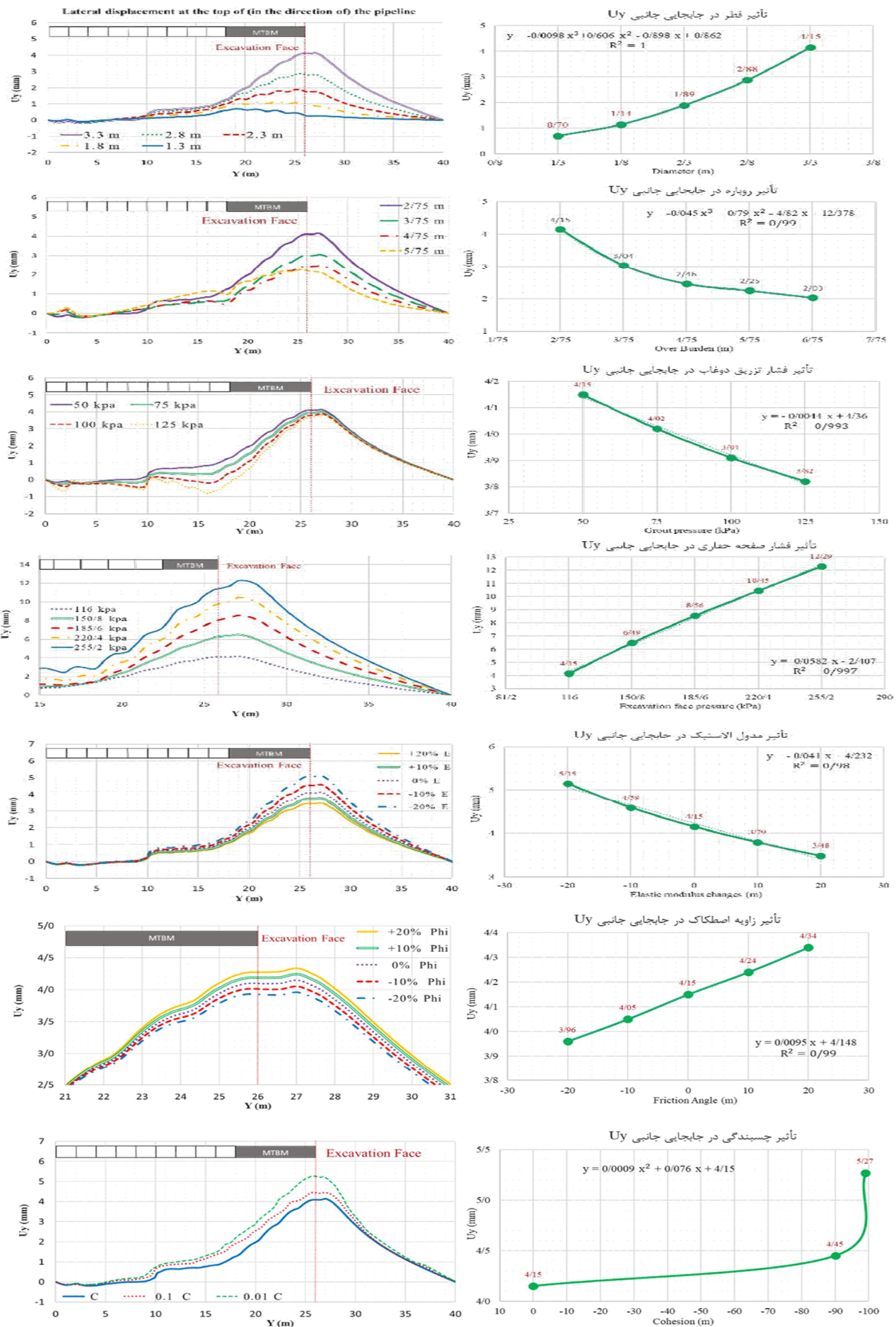
5-3- جابه‌جایی جانبی در راستای محور خط لوله (u_y)

مطابق شکل (18)، تغییر شکل جانبی خاک در راستای عمود بر محور طولی خط لوله (در امتداد محور X) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و تأثیر هر یک از فاکتورها مشخص شد. رابطه هر فاکتور با جابه‌جایی جانبی (u_y) نیز برآورد شد که قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است ضریب همبستگی (R) میزان صحت رابطه را نشان می‌دهد که هرچه قدر به 1 نزدیک باشد دارای صحت بیشتری خواهد بود.

هنگامی که لوله رانش از داخل حفره عبور می‌کند، لوله رانش و هد ماشین حفاری با خاک اطراف اصطکاک ایجاد می‌کنند. تحت تأثیر برش اصطکاک، خاک در امتداد خط لوله کشیده می‌شود که عمدتاً موجب حرکت خاک در راستای حفاری می‌شود.

هرچه قدر خط لوله نزدیک به سطح زمین قرار بگیرد، حرکت لایه خاک به موازات خط لوله بیشتر خواهد بود و با افزایش عمق قرارگیری خط لوله این مقدار کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار جابه‌جایی در سینه کار اتفاق می‌افتد. علت این امر ترکیب پارامترهای فشار صفحه حفاری و نیروی پیشران است که در سینه کار مقدار حداکثر را داراست. به علاوه اصطکاک و اندرکنش بین لوله رانش و خاک اطراف به حرکت خاک در راستای پیشروی کمک می‌کند.

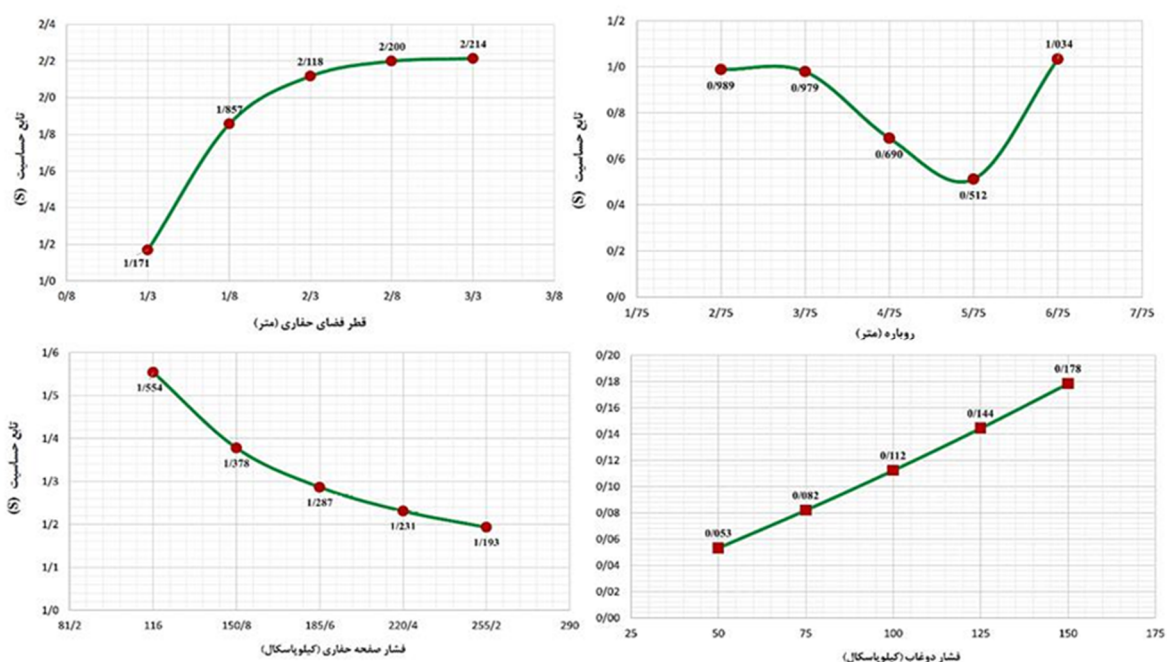
هرچه قدر فشار تزریق کمتر باشد، جابه‌جایی در راستای پیشروی خط لوله آشکارتر خواهد بود. فشار تزریق به صورت نرمال بر سطح محل حفاری اعمال می‌شود و مانع از برش و حرکت خاک به موازات خط لوله می‌شود. طبق نتایج افزایش 139/2 کیلوپاسکال فشار صفحه حفاری، افزایش 351/3٪ جابه‌جایی در 1 متری جلوی



شکل 18- تأثیر فاکتورهای اساسی در جابه‌جایی جانبی (u_y) و روابط آن‌ها

جدول 1- روابط جابه‌جایی جانبی و تابع حساسیت فاکتورهای اساسی

فاکتور	رابطه جابه‌جایی جانبی (u_y)	تابع حساسیت (S_i)
قطر	$U_y = -0.0098 d^3 + 0.606 d^2 - 0.898 d + 0.862$	$\frac{ -0.029 d^2 + 1.212 d - 0.898 \times d}{-0.0098 d^3 + 0.606 d^2 - 0.898 d + 0.862}$
روباره	$U_y = -0.045 O^3 + 0.79 O^2 - 4.82 O + 12.378$	$\frac{ -0.135 O^2 + 1.58 O - 4.82 \times O}{-0.045 O^3 + 0.79 O^2 - 4.82 O + 12.378}$
فشار تزریق دوغاب	$U_y = -0.0044 G + 4.36$	$\frac{0.0044 G}{-0.0044 G + 4.36}$
فشار صفحه حفاری	$U_y = 0.0582 P - 2.407$	$\frac{0.0582 P}{0.0582 P - 2.407}$
مدول کشسان	$U_y = -0.041 E + 4.232$	$\frac{0.041 E}{-0.041 E + 4.232}$
زاویه اصطکاک	$U_y = 0.0095 \varphi + 4.148$	$\frac{0.0095 \varphi}{0.0095 \varphi + 4.148}$
چسبندگی	$U_y = 0.0009 C^2 + 0.076 C + 4.15$	$\frac{ 0.018 C + 0.076 \times C}{0.0009 C^2 + 0.076 C + 4.15}$



شکل 19- منحنی تابع حساسیت پارامترهای بررسی شده

لازم به ذکر است که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، لغزش بین دانه‌های خاک روان‌تر شده، که در نهایت منجر به افزایش جابه‌جایی‌ها می‌شود.

جدول (2) آنالیز حساسیت پارامترهای (روباره، قطر، فشار تزریق دوغاب و فشار صفحه حفاری) را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است پارامتری نسبت به نشست سطح زمین حساس‌تر است که دارای فاکتور حساسیت بزرگتری باشد. جدول (3) آنالیز حساسیت پارامتر مدول کشسان را نشان می‌دهد. جدول (4) نیز تابع و شاخص حساسیت چسبندگی می‌باشد.

	۰/۰۴۵	۴/۴۸	
	۰/۰۵۱	۵/۰۴	
۰/۰۵۷	۰/۰۵۷	۵/۰۶	ماسه سیلتی
	۰/۰۶۳	۶/۱۶	
	۰/۰۷۰	۶/۷۲	
	۰/۱۶۲	۱۴/۴	
	۰/۱۸۶	۱۶/۲	
۰/۲۱	۰/۲۱۱	۱۸	ماسه سیلتی ریزدانه
	۰/۲۲۷	۱۹/۸	
	۲۶۵	۲۱/۶	
	۰/۴۴۹	۳۲	
	۰/۵۳۶	۳۶	
۰/۶۳۳	۰/۶۳۳	۴۰	ماسه متوسط تا درشت
	۰/۷۴۳	۴۴	
	۰/۸۶۹	۴۸	
۰/۶۳۳			بیشینه

جدول 4- آنالیز حساسیت چسبندگی

SI	S	C (kPa)	لایه
	۰/۰۰۱	۰/۰۷	
۰/۲۹۹	۰/۰۰۱	۰/۰۷	خاک بالادست
	۰/۲۹۹	۷	
	۰/۰۰۴	۰/۲۰۶	
۱/۵۰۹	۰/۰۵۴	۲/۰۶	رس سیلتی
	۱/۵۰۹	۲۰/۶	
	۰/۰۰۲	۰/۱	
۰/۵۱۲	۰/۰۲۲	۱	سیلت
	۰/۵۱۲	۱۰	
	۰/۰۰۴	۰/۲۲	
۱/۷۶۸	۰/۰۶۲	۲/۳	رس سیلتی ۱
	۱/۷۶۸	۲۳	
	۰/۰۰۱	۰/۰۳۶	
۰/۱۱۴	۰/۰۰۷	۰/۳۶	ماسه سیلتی
	۰/۱۱۴	۳/۶	
	۰/۰۰۱	۰/۰۳	
۰/۰۸۹	۰/۰۰۶	۰/۳	ماسه سیلتی ریزدانه
	۰/۰۸۹	۳	
	۰/۰۰۱	۰/۰۲	
۰/۰۵۲	۰/۰۰۴	۰/۲	ماسه متوسط تا درشت
	۰/۰۵۲	۲	
۱/۷۶۸			بیشینه

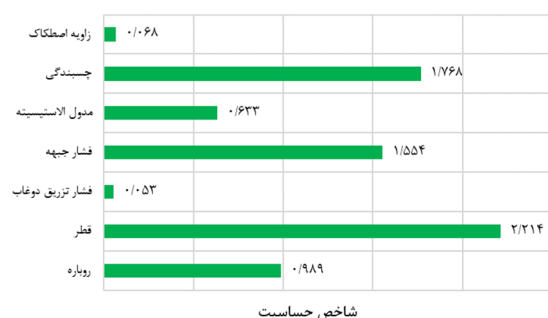
در جدول (5) تابع حساسیت و شاخص حساسیت مربوط به پارامتر زاویه اصطکاک داخلی آورده شده است.

جدول 2- آنالیز حساسیت (روباره، قطر، فشار تزریق دوغاب و فشار صفحه حفاری)

SI	روباره (متر)	S
	۲/۷۵	۰/۹۸۹
	۳/۷۵	۰/۹۷۹
۰/۹۸۹	۴/۷۵	۰/۶۹
	۵/۷۵	۰/۵۱۲
	۶/۷۵	۱/۰۳۴
SI	قطر (متر)	S
	۱/۳	۱/۱۷۱
	۱/۸	۱/۸۵۷
۲/۲۱۴	۲/۳	۲/۱۱۸
	۲/۸	۲/۲
	۳/۳	۲/۲۱۴
SI	فشار تزریق دوغاب (kPa)	S
	۵۰	۰/۰۵۳
	۷۵	۰/۰۸۲
۰/۰۵۳	۱۰۰	۰/۱۱۲
	۱۲۵	۰/۱۴۴
	۱۵۰	۰/۱۷۸
SI	فشار صفحه حفاری (kPa)	S
	۱۱۶	۱/۵۵۴
	۱۵۰/۸	۱/۳۷۸
۱/۵۵۴	۱۸۵/۶	۱/۲۸۷
	۲۲۰/۴	۱/۲۳۱
	۲۵۵/۲	۱/۱۹۳

جدول 3- آنالیز حساسیت مدول کشسان

SI	S	E (MPa)	لایه
	۰/۰۶۲	۶	
	۰/۰۷۰	۶/۷۵	
۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۷/۵	خاک بالادست
	۰/۰۸۷	۸/۲۵	
	۰/۰۹۶	۹	
	۰/۱۰۳	۹/۶۲	
	۰/۱۱۷	۱۰/۸۲	
۰/۱۳۲	۰/۱۳۲	۱۲/۰۳	رس سیلتی
	۰/۱۴۷	۱۳/۲۳	
	۰/۱۶۳	۱۴/۴۴	
	۰/۰۸۶	۸/۱۸	
	۰/۰۹۸	۹/۲۱	
۰/۱۱۰	۰/۱۱۰	۱۰/۲۳	سیلت
	۰/۱۲۲	۱۱/۲۵	
	۰/۱۳۵	۱۲/۲۸	
	۰/۱۰۵	۹/۸۴	
	۰/۱۲۰	۱۱/۰۷	
۰/۱۳۵	۰/۱۳۵	۱۲/۳	رس سیلتی ۱
	۰/۱۵۱	۱۳/۵۳	
	۰/۱۶۷	۱۴/۷۶	



شکل 20- نمودار شاخص حساسیت پارامترهای مؤثر در تغییر شکل جانبی زمین

طبق مشاهدات، ترتیب حساسیت و اهمیت پارامترهای بررسی شده به صورت زیر خواهد بود:

$$(D > C > P > O > E > \varphi > G)$$

نتایج نشان می‌دهد، قطر فضای حفاری بیشترین حساسیت و فشار تزریق دوغاب کمترین حساسیت را نسبت به سایر متغیرها در جابه‌جایی جانبی (u_y) زمین دارد، بنابراین بایستی دقت و صحت بیشتری در برآورد نمودن آن‌ها در مطالعات اولیه به کار گرفته شود.

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با در نظر گرفتن عملیات لوله‌رانی در خاک نرم و زیر سطح آب زیرزمینی به‌عنوان زمینه مهندسی، تغییر شکل زمین در راستای مختلف و همچنین برآمدگی سطح زمین با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تأثیر هر یک از پارامترها در الگوی تغییر شکل زمین در سه راستا و نیز تخمین میزان برآمدگی‌ها و محل دقیق آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج، حداکثر برآمدگی حدود 8 متر به‌عبارتی ($2/4D$) جلوتر از سینه کار رخ می‌دهد و سپس میزان برآمدگی به تدریج با نزدیک شدن به محل حفاری شده کاهش می‌یابد. با سه برابر شدن فشار تزریق دوغاب، جابه‌جایی جانبی (u_x) تقریباً 14 برابر شده و با افزایش 139/2 کیلوپاسکال فشار صفحه حفاری نیز افزایش 351/3% جابه‌جایی در 1 متری جلوی سینه کار را به دنبال خواهد داشت. در نهایت نتایج نشان داد حساسیت پارامترها به صورت $(D > C > P > O > E > \varphi > G)$ است که قطر فضای حفاری بیشترین حساسیت و فشار تزریق دوغاب کمترین حساسیت را نسبت به سایر متغیرها در جابه‌جایی جانبی (u_y) زمین دارد. بنابراین بایستی دقت و صحت بیشتری در برآورد نمودن آن‌ها در مطالعات اولیه به کار گرفته شود.

جدول 5- آنالیز حساسیت زاویه اصطکاک داخلی

لایه	φ	S	SI
خاک بالادست	4	0.009	0.011
	4/5	0.010	
	5	0.011	
	5/5	0.012	
	6	0.014	
	17/2	0.038	
رس سیلتی	19/35	0.042	0.047
	21/5	0.047	
	23/65	0.051	
	25/8	0.056	
سیلت	17/2	0.038	0.047
	19/35	0.042	
	21/5	0.047	
	23/65	0.051	
رس سیلتی 1	14/31	0.032	0.035
	15/9	0.035	
	17/49	0.039	
	19/08	0.042	
ماسه سیلتی	25/6	0.055	0.068
	28/8	0.062	
	32	0.068	
	35/2	0.075	
ماسه سیلتی ریزدانه	16	0.035	0.044
	18	0.040	
	20	0.044	
	22	0.048	
ماسه متوسط تا درشت	24	0.052	0.060
	22/4	0.049	
	25/2	0.055	
	28	0.060	
بیشینه	30/8	0.066	0.068
	33/6	0.071	

در نهایت، شاخص حساسیت مربوط پارامترهای بررسی شده در شکل (20) آورده شده است که نشان‌دهنده اهمیت هر فاکتور در جابه‌جایی جانبی زمین می‌باشد.

<https://doi.org/10.1139/t11-024>

- You GM, "3D FEM analysis on ground displacement induced by curved pipe-jacking construction", *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Taylor and Francis, London, 2008, 759-764.
- Zhao J, Zhu W, "Stability analysis and modelling of underground excavations in fractured rocks", Elsevier, Oxford, 2003.

5- مراجع

- Biggart A, "Closed face decisions-slurry or EPBM", *Tunnelling Journal*, 2011, February, 32-37.
- Cheng LY, Ariaratnam ST, Chen SX, "Analytical solution for predicting ground deformation associated with pipe jacking", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2017, 8 (3), 04017008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000267](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000267)
- Fan H, Lai J, Liu Y, "Numerical simulation research of soil deformation caused by pipe jacking construction", *Proceedings of the International Conference on Pipelines and Trenchless Technology 2014: Creating Infrastructure for a Sustainable World*, ASCE, 2014, 791-798. <https://doi.org/10.1061/9780784413821.085>
- Han X, Li W, Chen T, Liu W, "Sensitivity analysis of ground settlement induced by pipe-jacking construction in soft soil stratum", *E3S Web of Conferences*, 2019, 136, 04028. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913604028>
- Kalisz P, Zięba M, "Influence of soil deformation caused by mining on sewage pipelines built using the pipe jacking method", *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2018, 40 (2), 147-153. <https://doi.org/10.2478/sgem-2018-0010>
- Ma W, Wang B, Wang X, Zhou S, Wang B, "Soil layer disturbance caused by pipe jacking: measurement and simulation of a case study", *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25 (4), 1467-1478. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1467-8>
- Ng CWW, Sun HS, Lei GH, Shi JW, Mašin D, "Ability of three different soil constitutive models to predict a tunnel's response to basement excavation", *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52 (11), 1685-1698. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0361>
- Peila D, "Lo scavo di gallerie di piccola sezione con la tecnica del microtunnelling", *Strade and Autostrade*, 2001, (4), 85-91.
- Pellet F, Descoeurdes F, Egger P, "The effect of water seepage forces on the face stability of an experimental microtunnel", *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30 (2), 363-369. <https://doi.org/10.1139/t93-030>
- Pipe Jacking Association, "An introduction to pipe jacking and microtunnelling", London, 2017.
- Shi J, Wang Y, Ng CW, "Buried pipeline responses to ground displacements induced by adjacent static pipe bursting", *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50 (5), 481-492. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0304>
- Shou KJ, Chang FW, "Analysis of pipe-soil interaction for a miniature pipe jacking", *Journal of Mechanics*, 2006, 22 (3), 213-220. <https://doi.org/10.1017/S172771910000085X>
- Sterling RL, "Developments and research directions in pipe jacking and microtunneling", *Underground Space*, 2020, 5 (1), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.09.001>
- Thomson JC, "Microtunnelling and how we got there", *Trenchless International*, 2009, (August), 18-22.
- Wang Y, Shi J, Ng CW, "Numerical modeling of tunneling effect on buried pipelines", *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48 (7), 1125-1137.