



## Determining the appropriate dimensional and behavioral model for numerical modeling of the buried pipelines crossing strike-slip faults

M. R. Radaei\*, M. H. Erami

Civil Engineering Department, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** In recent decades, due to the increasing use of pipelines to transport a variety of fluids, the need to analyze and evaluate these lines at the crossing faults has increased. In this regard, many numerical studies have been carried out on buried pipes crossing faults. In most models used in previous researches, the selected characteristics for creating models were based on researchers' experiences. Therefore, naturally, the numerical results obtained from the FE analysis can be non-economic or erroneous. On the other hand, common regulations and standards for designing pipelines require special conditions and criteria in this field. Therefore, in this study, based on the existing bylaws in this field, the effect of selective pipe length and soil behavioral model on the accuracy of ABAQUS model results has been investigated. In this regard, first, the results of six models of buried steel pipeline with two different lengths and other similar conditions and then under other same and purely different conditions in terms of soil behavior model, the response of the buried pipeline crossing strike-slip fault was the basis of comparison. Finally, the review of the results shows that the unanchored length of the pipe is better for simulating the longitudinal dimension of the pipeline. Also, the behavioral model of CAP plasticity was selected as a suitable model to simulate soil behavior due to the approximation of the results with the relations of the regulations.

### Review History:

Received: Feb. 06, 2021

Revised: Jul. 30, 2021

Accepted: Aug. 25, 2021

Available Online: Sep. 03, 2021

### Keywords:

Buried steel pipeline

Strike-slip fault

Unanchored length

Cap plasticity model

Numerical modeling

### 1- Introduction

The behavior of buried pipelines in the face of faults was first investigated by Newmark and Hall in 1975 [1]. In the recent decade, Vazouras et al. parametrically simulated the behavior of pipelines crossing strike-slip faults using the finite element method. In their study, the pipe length for finite element analysis was considered 60 m and the Mohr-Coulomb behavioral model for soil was considered [2]. In 2015, Trifonov used the Drucker-Prager behavioral model for soil and a 50-meter pipe sample to analyze pipe stress and strain [3]. Shadabfar et al. used the Drucker-Prager model and a length 300 meters of pipe length in their modeling [4]. Finally, in 2020, Sandip et al. chose a length of 13.2 m for the pipe sample and the Mohr-Coulomb model for the soil [5], Melissianos et al. also chose a pipe length of 1500 meters in their finite element modeling [6]. As mentioned, in all the above researches, different lengths and soil behavior model have been used for modeling pipes and soil, which is based more on the use of trial and error and the experience of researchers. Also, during previous researches on the behavior of the pipeline crossing fault (after Vazouras), merely in order to reduce the computational volume and shorten the analysis time, selecting the length of the pipeline in proportion to

the diameter of the pipe (e.g., 60 times the diameter of the pipe) has been very common. In other words, the selection of specifications to model these lines in previous research has no scientific support and has been done only for simplification. Therefore, naturally, the numerical results obtained from the finite element analysis can be conservative or erroneous. On the other hand, common regulations and standards for the design of pipelines as the main references, require special conditions and rules in this regard. For example, the use of unanchored pipe length for design and modeling is recommended to designers in this industry. As a result, it should be specified that the appropriate length to simulate the behavior of the pipe in the finite element analysis is the unanchored length or other cases. For this purpose, and considering the multiplicity of pipe modeling cases and the importance of executive analysis in transmission line projects, it is necessary to investigate and resolve the ambiguity in selecting the appropriate dimensional and behavioral model specifications for modeling steel pipes. Therefore, in the present study, we determine the appropriate length of the pipeline and soil behavioral model for modeling with the help of standard relationships.

\*Corresponding author's email: m.r.radaei@iau-tnb.ac.ir



**Table 1. Average standard pipe strain and the average strain in a ABAQUS model**

No	Outside diameter(inch)	Pipe length(m)	Average strain in the pipe on standards (Eq 2)	Average finite element strain
1	30	45.72	0.01551	0.00110
2		181.63	0.00380	0.00332
3	42	64.02	0.01103	0.00191
4		281.51	0.00240	0.00267
5	56	85.32	0.00829	0.00074
6		322.49	0.00219	0.00135

**Table 2. Comparison of strain obtained from numerical analysis and regulations (Eq2) for different plasticity behavior of soil**

No	Outside diameter(inch)	Pipe length(m)	Average strain in the pipe on standards (Eq 2)	soil behavior model	Average finite element strain
7	30	181.63	0.00380	Mohr-Coulomb	0.00095
				Drucker-Prager	0.00762
				CAP	0.00393
8	42	281.51	0.00240	Mohr-Coulomb	0.00068
				Drucker-Prager	0.00515
				CAP	0.0030
9	56	322.49	0.00219	Mohr-Coulomb	0.00043
				Drucker-Prager	0.00470
				CAP	0.00285

**2- Design Criteria and Required Definitions**

Common pipeline industry standards such as ALA [7] and ASME [8] suggest the length of the pipe for any modeling or design according to Equation 1, to consider the effect of anchor points on the pipe design.

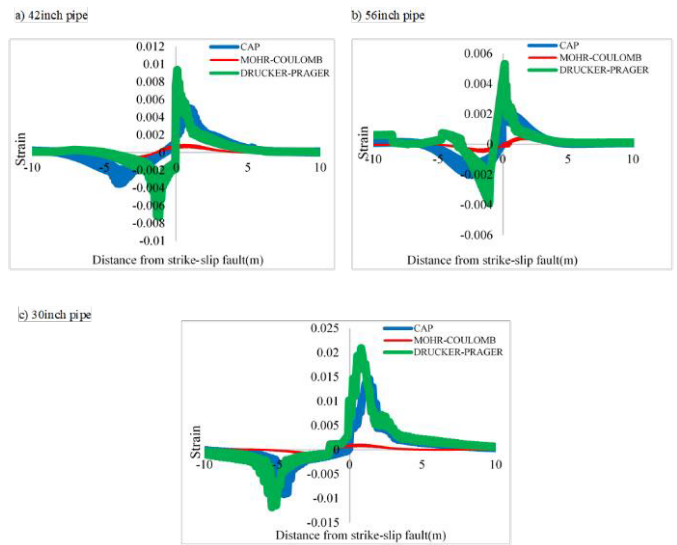
$$L_a = \frac{\pi D t_p E_p \varepsilon_y}{T_u} \tag{1}$$

To investigate the behavior of the pipe due to the fault phenomenon, according to the type of fault, Equation 2 has been presented to calculate the strain of the pipe.

$$\varepsilon = 2 \left[ \frac{\delta_{fax-design}}{2L_a} + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_{ftr-design}}{2L_a} \right)^2 \right] \tag{2}$$

**3- Method of Modeling**

To conduct this research, first 6 pipe models in diameters of 30, 42 and 56 inches were made under the same conditions and only differ in terms of pipe length in ABAQUS [9]. The length of 3 models was 60 times the diameter of the pipe and the length of the other 3 models was selected equal to the unanchored length of the pipe (obtained from Equation 1). After performing the analysis, the average strain obtained from the numerical analysis for these 6 models was compared with the average strain obtained from Equation 2. As a result, the model whose strain is closer to the Equation 2 strain is selected as the most optimal mode for modeling the longitudinal dimension of the pipe. In the next step and to determine the most appropriate soil behavioral model for simulation, each model with 3 common soil behavioral models, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager and CAP in ABAQUS was modeled. In these models, under other conditions of the same



**Fig. 1. Pipe strains for different plasticity behavior of soil obtained from FE analysis**

and only different in terms of how to model soil behavior, the response obtained from the FE analysis was again compared with the regulatory values (Equation 2) and the best model to simulate the backfill sand soil was selected.

**4- Results and Discussion**

In general, the larger the length of the pipe, the lower the maximum amount of strain in the pipe due to the movement of the fault (in the same displacement) [10]. According to the standards strains obtained in Table 1, this trend is also true for the average strain of the pipe at the fault location. In the strains obtained from numerical analysis, however, this trend is not established, i.e., with increasing the length of the model, the average strain value increases. As shown in Table 1, the average strain results of the model with an unanchored length are close to the mean strain obtained from the regulation (Equation 2) and therefore, the unanchored length of the pipeline is selected as the appropriate length for

modeling the longitudinal dimension of the pipe.

The diagram in Figure 1 shows the strain that occurred for the models made in the ABAQUS in this case. Also, the results of calculating the strain of numerical analysis and the strain obtained from Equation 2 for all three modes of soil behavior model are presented in Table 2.

Considering the appropriate approximation of the results obtained from the CAP behavioral model in comparison with the results obtained from the regulatory relations, this behavioral model is introduced to properly simulate the behavior of backfill sand soil.

## 5- Conclusion

This study was conducted to select the appropriate pipe length and soil behavioral model for modeling. In this regard, by using the criteria in common standards as well as numerical modeling and comparing numerical results with the relationships of regulations, the following result was obtained: It was determined that for numerical modeling of pipelines, the unanchored length for the longitudinal dimension of the pipe sample should be used and selecting the length of the pipeline in proportion to the diameter of the pipe (for example, equivalent to 60 times the diameter of the pipe) or other experimental values, although they reduce the volume of calculations and analysis time, but have no scientific basis and the results are not accurate enough. Therefore, it is worthwhile for researchers in this field to use the unanchored length, which is also mentioned in most regulations. There are various behavioral models to simulate soil behavior. By conducting this research, according to the regulatory relations, it was determined that the CAP model is the most appropriate model for simulating backfill sand behavior.

## References

[1] N.M. Newmark, W.J. Hall, Pipeline design to resist large

fault displacement, *Earthquake Engineering*, (1975) 416-425.

[2] P. Vazouras, S.A. Karamanos, P. Dakoulas, Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (2010) 1361-1376.

[3] O.V. Trifonov, Numerical stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active strike-slip faults with an emphasis on fault modeling aspects, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, (2015).

[4] M. Shadab Far, N. Hassani, E.V. Muho, Empirical expressions for the maximum induced strain on buried steel pipelines crossing strike-slip faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116 (2019) 490-494.

[5] S. Dey, S. Chakraborty, S. Tesfamariam, Structural performance of buried pipeline undergoing strike-slip fault rupture in 3D using a non-linear sand model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 135 (2020) 106-180.

[6] V.E. Melissianos, D. Vamvatsikos, C.J. Gantes, Methodology for failure mode prediction of onshore buried steel pipelines subjected to reverse fault rupture, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 135 (2020) 106-116.

[7] American Lifelines Alliance (ALA)- Seismic Guidelines for Water Pipelines, Federal Emergency Management Agency (FEMA) and the National Institute of Building Sciences (NIBS), 2005.

[8] ASME B31.8-Gas transmission and distribution piping systems, American Society of Mechanical Engineers, 2003.

[9] D.S.S. Corp, ABAQUS, 2012.

[10] M.J. O'Rourke, J.X. Liu, *Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines*, 2006.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. R. Radaei, M. H. Erami, *Determining the appropriate dimensional and behavioral model for numerical modeling of the buried pipelines crossing strike-slip faults*, *AUT J. Model. Simul.*, 54(4) (2022) 289-292.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19590.7207](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19590.7207)







## انتخاب مشخصه ابعادی و رفتاری مناسب برای مدل سازی عددی خطوط لوله مدفون تحت جابجایی گسل امتداد لغز با کمک روابط آیین نامه

محمد رضا ردایی\*، محمدحسین ارمی

دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران - شمال، تهران، ایران .

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۰۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۱

### کلمات کلیدی:

خطوط لوله فولادی مدفون

گسل امتداد لغز

طول موثر مهار نشده

مدل رفتاری دراکر پراگر اصلاح شده

مدل سازی عددی

**خلاصه:** طی دهه های اخیر، به دلیل استفاده روزافزون از خطوط لوله جهت انتقال انواع سیالات، ضرورت تحلیل و ارزیابی این خطوط در محل عبور از گسل ها افزایش یافته است. در همین راستا، مطالعات عددی بسیاری در خصوص لوله های مدفون مواجهه با گسل صورت پذیرفته است. در غالب پژوهش های پیشین، مشخصات انتخابی برای ایجاد مدل ها بر مبنای تجربیات پژوهشگران انتخاب گردیده است. به همین جهت طبیعتاً نتایج عددی به دست آمده از نرم افزارها می تواند محافظه کارانه یا با خطا روبرو گردد. از طرفی آیین نامه ها و استانداردهای متداول طراحی خطوط لوله به عنوان مراجع اصلی، شرایط و ضوابط خاصی را در این خصوص الزام می دارند. لذا طی پژوهش حاضر، با استناد به روابط آیین نامه ای موجود در این زمینه، نسبت به بررسی اثر طول لوله انتخابی و مدل رفتاری خاک در دقت نتایج مدل نرم افزاری آباکوس اقدام گردیده است. در این راستا، ابتدا مدل لوله فولادی مدفون در سه قطر انتخابی و دارای دو طول متفاوت و سایر شرایط یکسان و سپس، تحت سایر شرایط یکسان و صرفاً متفاوت از نظر نحوه مدل نمودن رفتار خاک در مواجهه با جابه جایی گسل امتداد لغز مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت نتایج به دست آمده از نرم افزار با روابط آیین نامه ای مقایسه گردید. بررسی نتایج به دست آمده بیانگر آن است که می بایست از این پس از طول مهار نشده لوله جهت مدل سازی بعد طولی لوله استفاده گردد. همچنین مدل رفتاری دراکر-پراگر اصلاح شده با توجه به تقریب نتایج با روابط آیین نامه به عنوان مدل مناسب جهت شبیه سازی رفتار خاک ماسه ای انتخاب گردید.

### ۱- مقدمه

شبیه سازی طول نمونه ها به ترتیب بیست، سی و چهل برابر قطر لوله در نظر گرفته شد. تاکادا و همکاران [۵] در ادامه در سال ۲۰۰۱ روش جدیدی را برای محاسبه کرنش بحرانی بحرانی خطوط لوله با طول فرضی  $L$  در محل عبور از گسل ها ارائه دادند. کارامیتروس و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۷ با استفاده از مدلی به طول ۱۰۰۰ متر به بررسی تنش در خطوط مدفون در محل تقاطع با گسل امتداد لغز پرداختند که در نهایت نتایج آن ها باعث بهبود و تکمیل نتایج وانگ و یه گردید. آن ها در این مدل سازی از خاک ماسه ای مناسب و برای شبیه سازی سطوح تسلیم خاک از روابط پیشنهادی تراژمن-ارورک و هانسن استفاده نمودند. سپس تریفنوف و چرنی [۷] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از نمودار تنش و کرنش آزمایشگاهی برای نمونه خاک و طول  $L$  برای لوله، این خطوط را مورد تحلیل قرار دادند. وازوراس و همکاران [۸]، رفتار خطوط لوله عبوری از گسل های راستا لغز را با استفاده از روش اجزای

بررسی رفتار خطوط لوله مدفون در مواجهه با گسل برای اولین بار توسط نیومارک و هال [۱] در سال ۱۹۷۵ صورت گرفت. در این مدل سازی لوله به صورت یک کابل با طول نامحدود تحلیل گردید. کندی [۲] و همکاران [۲] در سال ۱۹۷۷ حداقل طول لوله جهت مدل سازی را ۳۶۶ متر عنوان نمودند. در این پژوهش لوله به صورت کابل با طول محدود فرض شده بود. وانگ و یه [۲] [۳] در سال ۱۹۸۵ با در نظر گرفتن سختی خمشی خط لوله روش کندی را بهبود دادند. تاکادا و همکاران [۴]، روش ساده شده ای برای به دست آوردن کرنش بیشینه در لوله های فولادی عبوری از روی گسل ها ارائه نمودند که در آن خصوصیات غیرخطی ماده و هندسی در نظر گرفته شده بود. در این

- 1 Newmark and hall<sup>۱</sup>.
- 2 . Kennedy et al
- 3 Wan g and Yeh<sup>۲</sup>.
- 4 Takada et al<sup>۴</sup>.

5 . Karamitros et al

6 . Trifonov and Cherniy

7 Vazouras et al<sup>۷</sup>.

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: m.r.radaei@iau-tnb.ac.ir



عبوری از گسل، بسیار متداول بوده است. به عبارت دیگر انتخاب مشخصات جهت مدل‌سازی این خطوط در پژوهش‌های پیشین، فاقد پشتوانه علمی بوده و صرفاً جهت ساده‌سازی صورت گرفته است. به همین جهت طبیعتاً نتایج عددی به دست آمده از نرم‌افزارها می‌تواند محافظه کارانه یا با خطا روبرو گردد. از طرفی آیین‌نامه‌ها و استانداردهای متداول طراحی خطوط لوله به عنوان مراجع اصلی، شرایط و ضوابط خاصی را در این خصوص الزام می‌دارند به عنوان مثال استفاده از طول موثر مهار نشده<sup>۷</sup> را برای طراحی و مدل‌سازی به متولیان و طراحان خطوط لوله جهت بعد طولی لوله پیشنهاد می‌دهند. در نتیجه؛ به عنوان نمونه می‌بایست مشخص گردد که طول مناسب جهت شبیه‌سازی رفتار لوله در نرم‌افزار، طول پیشنهادی آیین‌نامه است (طول مهار نشده) یا سایر حالات. به همین منظور و با توجه به تعدد حالات مدل‌سازی لوله و نیز اهمیت اجرایی بودن تحلیل در کارگاه‌ها و پروژه‌های خطوط انتقال، لازم است ابهام مطرح در زمینه انتخاب مشخصات ابعادی و رفتاری مناسب برای مدل‌سازی لوله‌های فولادی، بررسی و رفع گردد. لذا طی پژوهش حاضر، در گام اول به تعیین بعد طولی مناسب خط لوله جهت مدل‌سازی با کمک روابط استاندارد می‌پردازیم و سپس پس از تعیین آن، به انتخاب مدل رفتاری مناسب جهت شبیه‌سازی خاک ماسه‌ای در نرم‌افزار آباکوس [۲۰] با کمک همین روش خواهیم پرداخت.

## ۲- ضوابط طراحی مورد نیاز خطوط لوله

با توجه به اینکه حجم عمده‌ای از خطوط لوله صنایع نفت و گاز را خطوط لوله مدفون تشکیل می‌دهند، ضوابط مربوط به طراحی لرزه‌ای آن‌ها با جزئیات بیشتری نسبت به خطوط لوله رو زمینی بیان شده‌اند که در زیر به الزامات مورد نیاز این تحقیق می‌پردازیم:

### ۲-۱- طول موثر مهار نشده

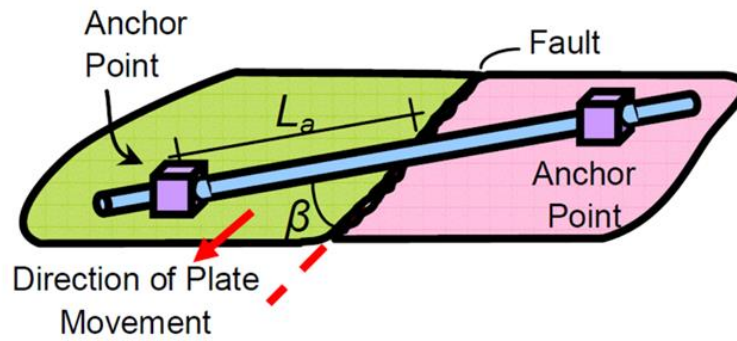
استانداردهای متداول صنعت خط لوله مانند انجمن شریان‌های حیاتی آمریکا<sup>۸</sup> [۲۱]، انجمن مهندسان مکانیک آمریکا<sup>۹</sup> [۲۳ و ۲۲] و نیز آیین‌نامه کانپور هند<sup>۱۰</sup> [۲۴] به جهت در نظر گرفتن اثر نقاط مهار در طراحی لوله، اندازه طول لوله جهت هر گونه مدل‌سازی یا طراحی را مطابق رابطه (۱) پیشنهاد می‌دهند. این نقاط مهار در اجرا برای جلوگیری از لغزش و جابجایی خطوط و

محدود به صورت پارامتریک شبیه‌سازی کردند. در مطالعه آن‌ها طول لوله برای تحلیل اجزا محدود ۶۰ متر و مدل رفتاری موهر-کلمب برای خاک در نظر گرفته شد. همچنین در این تحقیق اثر نوع خاک، نسبت قطر به ضخامت لوله و فشار داخلی لوله بر رفتار لوله‌های فولادی مدفون مورد مطالعه قرار گرفت. این پژوهشگران [۹] در ادامه، اثر زاویه عبور خط لوله از گسل را نیز مورد بررسی قرار دادند. جوشی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۰]، پاسخ خطوط لوله مدفون تحت گسلس معکوس را با استفاده از روش اجزا محدود بررسی نمودند. در این شبیه‌سازی طول لوله ۱۲۰۰ متر و از منحنی تنش-کرنش برای تعیین سطوح رفتاری خاک استفاده شد. ژانگ و همکاران<sup>۲</sup> [۱۱] به جهت بررسی کماتش لوله‌های مدفون تحت جابجایی گسل امتداد لغز از بعد طولی ۶۰ متر برای لوله و مدل موهر-کلمب برای خاک استفاده نمودند. تریفنوف [۱۲] در سال ۲۰۱۵ به منظور تحلیل تنش و کرنش لوله‌ها از مدل رفتاری دراگر-پراگر برای خاک و نمونه لوله‌ای به اندازه ۵۰ متر استفاده نمود. ساروانیس و همکاران<sup>۳</sup> [۱۳] برای مقایسه و بررسی نمونه آزمایشگاهی خود، شبیه‌سازی خود را با مدل ۶۰ متری لوله و سطح تسلیم موهر کلمب برای خاک در آباکوس انجام دادند. در ادامه، لیو و همکاران<sup>۴</sup> [۱۴] طول لوله را ۱۰۰ متر و مدل موهر-کلمب را برای رفتار خاک انتخاب نمودند. حسنی [۱۵] در سال ۲۰۱۸ و وطن اسکویی [۱۶] در سال ۲۰۱۹ به همراه سایر همکاران در پژوهش‌های جداگانه‌ای طول لوله را به ترتیب ۳ و ۴ متر برگزیدند. شاداب‌فر و همکاران [۱۷] در مدل‌سازی خود از مدل دراگر-پراگر و طول ۳۰۰ متری لوله استفاده نمودند. در نهایت ساندیپ<sup>۵</sup> در سال ۲۰۲۰ با همکاران [۱۸] خود طول ۱۳/۲ متر را برای نمونه لوله و مدل موهر-کلمب را برای خاک انتخاب نمودند و ملیسانوس<sup>۶</sup> به همراه همکاران [۱۹] نیز در همین سال طول را در مدل‌سازی‌های اجزا محدود خود ۱۵۰۰ متر منظور نمودند. همانطور که بیان گردید، در تمامی پژوهش‌های فوق‌الذکر از طول‌ها و سطوح تسلیم متفاوت به ترتیب برای مدل‌سازی لوله و خاک استفاده شده است که مبنای آن بیشتر برحسب استفاده از آزمون و خطا و تجربه محققین می‌باشد. همچنین در طول دهه اخیر (پس از وازوراس)، صرفاً به منظور کاهش حجم محاسبات و کوتاه شدن زمان تحلیل، منظور نمودن طول خط لوله در تناسب با قطر لوله (برای مثال، معادل ۶۰ برابر قطر لوله) طی تحقیقات پیشین بر روی رفتار خط لوله

- 1 . Joshi
- 2 . Zhang et al
- 3 . Sarvanis et al
- 4 . Liu et al
- 5 .Sandip
- 6 . Melissianos

- 7 .Unanchor length
- 8 .American Lifelines Alliance(ALA)
- 9 American Society of Mechanical Engineers(ASME)
- 10 IITK-GSDMA Guidelines





شکل ۱. طول مهار نشده لوله [۲۴ و ۲۱]

Fig. 1. Unanchored length of pipe [21, 24]

$k_0$  ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون و  $\delta$  زاویه اصطکاک خاک و لوله می‌باشد. ضریب چسبندگی بین خاک و لوله به صورت زیر و از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$\alpha_s = 0.608 - 0.123c - \frac{0.274}{c^2 + 1} + \frac{0.695}{c^3 + 1} \quad (3)$$

همچنین زاویه اصطکاک بین خاک و لوله ( $\delta$  در رابطه (۲)) را نیز می‌توان برابر حاصل ضرب  $\delta = \varphi * f$  منظور نمود که در آن  $f$  ضریب اصطکاک بین خاک و لوله بوده و بر حسب نوع پوشش لوله، از جدول ۱ تعیین می‌گردد:

در نهایت مقدار  $k_0$ ، ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون برابر است با  $k_0 = 1 - \sin \varphi$

## ۲-۲- کرنش متوسط خط لوله در محل تقاطع با گسل

برای بررسی رفتار لوله در اثر پدیده گسلش، با توجه به نوع گسل و نحوه قرار گرفتن لوله نسبت به آن، روابط مختلفی برای محاسبه تغییر شکل لوله ارائه شده است. این روابط در استانداردهای متداول فوق الذکر و انجمن مهندسان عمران آمریکا [۲۵] نیز آورده شده‌اند که برای گسل امتداد لغز به مانند روابط (۴) تا (۷) می‌باشد. جزئیات محاسبه کرنش متوسط لوله در محل تقاطع با گسل، به شرح ذیل، می‌باشد:

به منظور گیرداری بیشتر لوله استفاده می‌گردند. از آنجایی که نمی‌توان این نقاط را در مدل‌سازی شبیه‌سازی کرد، می‌بایست نقاط مهار خط لوله به اندازه کافی از محور گسل دور شوند تا نیروهای اعمالی بر لوله در حین گسلش، تنها از طریق نیروی اصطکاک بین لوله و خاک پیرامونی خنثی شوند و اثر بلوک مهاری از میان برود. به عبارت دیگر با دور کردن نقاط مهاری طول خط لوله افزایش می‌یابد و با افزایش طول، اندرکنش خاک و لوله بیشتر می‌گردد که این افزایش اندرکنش اثر بلوک مهاری در اجرا را در مدل‌سازی تامین می‌کند. شکل ۱ بیانگر طول موثر مهار نشده لوله می‌باشد.

$$L_a = \frac{\pi D t_p E_p \varepsilon_y}{T_u} \quad (1)$$

در این رابطه،  $L_a$  طول موثر مهار نشده،  $D$  قطر خارجی لوله،  $t_p$  ضخامت دیواره لوله،  $E_p$  مدول الاستیسیته،  $\varepsilon_y$  کرنش جاری شدن مصالح و  $T_u$  بیشینه نیروی اصطکاک در لوله و خاک می‌باشد که خود از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$T_u = \pi D c \alpha_s + \frac{\pi D}{2} H_s \bar{\gamma} (1 + k_0) \tan \delta \quad (2)$$

در رابطه فوق  $c$  ضریب چسبندگی خاک،  $\alpha_s$  ضریب چسبندگی خاک و لوله،  $\bar{\gamma}$  وزن مخصوص موثر خاک،  $H_s$  عمق لایه خاک تا مرکز لوله،

جدول ۱. ضریب اصطکاک بین خاک و لوله [۲۵، ۲۳ و ۲۱]

Table 1. Friction factor for f various external coatings [21, 23, 25]

$f$	نوع پوشش لوله
۱	بتنی
۰/۹	قطران
۰/۸	فولاد زبر
۰/۷	فولاد نرم
۰/۶	اپوکسی با اتصال گرم
۰/۶	پلی اتیلن

که در آن‌ها، پارامتر  $\delta_{fs}$  برای گسل امتداد لغز از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد:

$$\varepsilon = 2 \left[ \frac{\delta_{fax-design}}{2L_a} + \frac{1}{2} \left( \frac{\delta_{fir-design}}{2L_a} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\log \delta_{fs} = -6.32 + 0.90M_w \quad (7)$$

در این رابطه  $\delta_{fir-design}$  تغییر مکان طراحی گسل در جهت عمود بر لوله و  $\delta_{fax-design}$  تغییر مکان طراحی گسل در جهت محور لوله می‌باشد که از رابطه (۵) محاسبه می‌گردند:

۳- روش انجام پژوهش

برای انجام این پژوهش، پس از انجام صحت‌سنجی‌های مورد نیاز، در گام اول و به منظور تعیین طول مناسب برای مدل‌سازی، ابتدا تعداد ۳ مدل به صورت، لوله فولادی مدفون در ۳ قطر ۳۰، ۴۲ و ۵۶ اینچ و دارای طولی به اندازه ۶۰ برابر قطر در آباکوس مدل‌سازی و پس از اعمال جابجایی گسل امتداد لغز به اندازه یک متر با زاویه تقاطع ۴۵ درجه، کرنش مدل‌ها در محل تقاطع با گسل به دست آمد. سپس به ازای هر مدل دارای طول ۶۰ برابر قطر (۳ مدل مذکور)، یک مدل خط لوله مدفون با طولی به اندازه طول مهار نشده لوله مطابق رابطه (۱) ایجاد گردید تا جمع مدل‌ها در این مرحله به ۶ برسد. در نهایت تحت سایر شرایط یکسان در آباکوس تحلیل صورت پذیرفت و مقدار کرنش در محل عبور از گسل برای مدل‌های دارای طول مهار نشده نیز به دست آمد. سرانجام مقادیر کرنش‌های به دست آمده از تحلیل المان محدود برای این ۶ مدل با مقدار کرنش متوسط آیین‌نامه‌ای که از رابطه (۴) به دست می‌آید مقایسه گردید. در نتیجه مدلی که کرنش آن به کرنش آیین‌نامه‌ای نزدیک‌تر باشد به عنوان بهینه‌ترین حالت جهت مدل‌سازی بعد طولی لوله انتخاب می‌گردد. در گام بعدی و برای تعیین مناسب‌ترین مدل

$$\begin{aligned} \delta_{fax-design} &= \delta_{fax} I_L \\ \delta_{fir-design} &= \delta_{fir} I_L \end{aligned} \quad (5)$$

در این رابطه،  $\delta_{fir}$  مؤلفه حرکت گسل در جهت عمود بر لوله و  $\delta_{fax}$  مؤلفه حرکت گسل در جهت محور لوله می‌باشد که برای گسل امتداد لغز، بر مبنای رابطه (۶) محاسبه می‌گردند. شایان ذکر است، در این روابط، ضریب اهمیت خط لوله می‌باشد که در این پژوهش برابر یک منظور شده است:

$$\begin{aligned} \delta_{fax} &= \delta_{fs} \sin \beta \\ \delta_{fir} &= \delta_{fs} \cos \beta \end{aligned} \quad (6)$$



جدول ۲. مشخصات خاک ماسه‌ای

Table 2. Material properties for sand backfill

Sand Backfill	
چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۱۷۰۰
مدول یانگ (Mpa)	۵
نسبت پواسون	۰/۲
زاویه اصطکاک $\varphi$ (deg)	۴۰/۰۱
زاویه اتساع $\psi$ (deg)	۰
ضریب چسبندگی (kPa)	۵/۱۳۵

$$\frac{0.695}{(0.0513507)^3 + 1} = 1.02268$$

مقدار پارامتر زاویه اصطکاک بین خاک و لوله ( $\delta$ ) با توجه به مشخصات خاک (جدول ۲) و نوع پوشش سطح لوله (جدول ۱) منظور شده در این پژوهش، برابر است با:

$$\delta = \varphi f = 0.8 \times 40.01 = 32.008^\circ$$

مقدار  $K_0$ ، ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون برابر است با:

$$k_0 = 1 - \sin \varphi = 1 - \sin(40.01) = 0.357$$

مقدار  $H_s$  برابر است با عمق لایه خاک تا مرکز لوله که  $\frac{2}{5}$  برابر قطر در هر حالت در نظر گرفته شده و  $\bar{\gamma}$  وزن مخصوص مؤثر خاک می‌باشد که از جدول ۲ به دست می‌آید. در نتیجه با جایگذاری مقادیر فوق در رابطه (۲) داریم:

$$T_u = (\pi \times 1.422 \times 5135.07 \times 1.02268) + \left( \pi \times 1.422 \times 17000 \times 3.555 \times 1.357 \times \tan 32.008 \times \frac{1}{2} \right) = 137892.17 \frac{N}{m}$$

در ادامه، طول مؤثر مهار نشده برای لوله با قطر ۵۶ اینچ (۱/۴۲۲ متر) و ضخامت دیواره برابر با  $\frac{20}{62}$  میلی‌متر، به صورت زیر و مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

رفتاری خاک ماسه‌ای جهت شبیه‌سازی، پس از تعیین مدل‌های بهینه حالت قبل، هر مدل با ۳ نوع مدل رفتاری متداول خاک یعنی موهر-کلمب، دراکر-پراگر و دراکر-پراگر اصلاح شده (کپ) در آباکوس مدل‌سازی شد. در این مدل‌ها، تحت سایر شرایط یکسان و صرفاً متفاوت از نظر نحوه مدل نمودن رفتار خاک، پاسخ به دست آمده از نرم‌افزار مجدداً با مقادیر آیین‌نامه‌ای (رابطه (۴)) مقایسه گردید و بهترین مدل جهت شبیه‌سازی سطوح تسلیم در خاک ماسه‌ای به دست آمد.

#### ۴- انجام محاسبات مربوطه

در این بخش به انجام محاسبات مورد نیاز مربوطه مطابق با روابط (۱) تا (۷) می‌پردازیم:

#### ۴-۱- محاسبه طول مؤثر مهار نشده جهت مدل‌سازی

محاسبه طول مؤثر مهار نشده لوله مطابق رابطه (۱)، مستلزم تعیین بیشینه نیروی اصطکاک در فصل مشترک لوله و خاک، بر مبنای پارامترهای زیر، می‌باشد. برای این کار از مشخصات خاک مندرج در جدول ۲ برای پارامترهای خاک استفاده می‌گردد. ضریب چسبندگی بین خاک و لوله  $\alpha_s$  در این تحقیق به صورت زیر و از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$\alpha_s = 0.608 - 0.123(0.0513507) - \frac{0.274}{(0.0513507)^2 + 1}$$

جدول ۳. مقادیر طول لوله جهت مدل سازی

Table 3. Type of pipe length for finite element model

قطر خط لوله	نوع طول لوله	اندازه طول لوله
inch۳۰	۶۰ برابر قطر لوله	۴۵/۷۲ متر
	طول مهار نشده	۱۸۱/۶۳ متر
inch۴۲	۶۰ برابر قطر لوله	۶۴/۰۲ متر
	طول مهار نشده	۲۸۱/۵۱ متر
inch۵۶	۶۰ برابر قطر لوله	۸۵/۳۲ متر
	طول مهار نشده	۳۲۲/۴۹ متر

$$\delta_{fix} = (1)(\cos 45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2}, \delta_{fir} = (1)(\sin 45^\circ) = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

بر این اساس، تغییر مکان طراحی گسل مطابق رابطه (۵) برابر خواهد بود با:

$$\delta_{fix-design} = \frac{\sqrt{2}}{2}(1), \delta_{fir-design} = \frac{\sqrt{2}}{2}(1)$$

با قرار دادن مقادیر پارامترهای فوق در رابطه (۴)، مقدار کرنش برای لوله ۵۶ اینچ با طول مهار نشده خط لوله، به صورت مقابل محاسبه می گردد:

$$\varepsilon = 2 \left[ \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}}{2(322.49)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}}{2(322.49)} \right)^2 \right] = 0.002193$$

و به همین ترتیب برای همین قطر و طول خط لوله معادل ۶۰ برابر قطر

لوله، داریم:

$$\varepsilon = 2 \left[ \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}}{2(85.32)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}}{2(85.32)} \right)^2 \right] = 0.00829$$

برای سایر لوله‌های مورد بررسی در پژوهش نیز محاسبات فوق اشاره انجام پذیرفته است که جزئیات مربوطه در جدول ۴ ارائه می گردد.

$$L_a = \frac{\pi \times 1.422 \times 20.62 \times 10^{-3} \times 2.1 \times 10^{11} \times 0.0023}{137892.17} = 322.49m$$

برای سایر لوله‌های مورد بررسی در پژوهش نیز محاسبات فوق اشاره

انجام پذیرفته است که جزئیات مربوطه در ادامه ارائه می گردد.

طول مؤثر مهار نشده برای لوله با قطر ۳۰ اینچ:

$$L_a = \frac{\pi \times 0.762 \times 7.14 \times 10^{-3} \times 2.1 \times 10^{11} \times 0.0023}{45427.87} = 181.63m$$

طول مؤثر مهار نشده برای لوله با قطر ۴۲ اینچ:

$$L_a = \frac{\pi \times 1.067 \times 14.27 \times 10^{-3} \times 2.1 \times 10^{11} \times 0.0023}{82029.56} = 281.51m$$

در نهایت در این پژوهش مطابق جدول ۳ دو نوع طول لوله داریم، طول

خط لوله در ۳ مدل معادل ۶۰ برابر قطر لوله و در ۳ مدل دیگر، برابر با طول مهار نشده خط لوله می باشد.

۴-۲- محاسبه کرنش متوسط لوله در محل گسل امتداد لغز

جزئیات محاسبه کرنش متوسط لوله در محل تقاطع با گسل، طبق رابطه

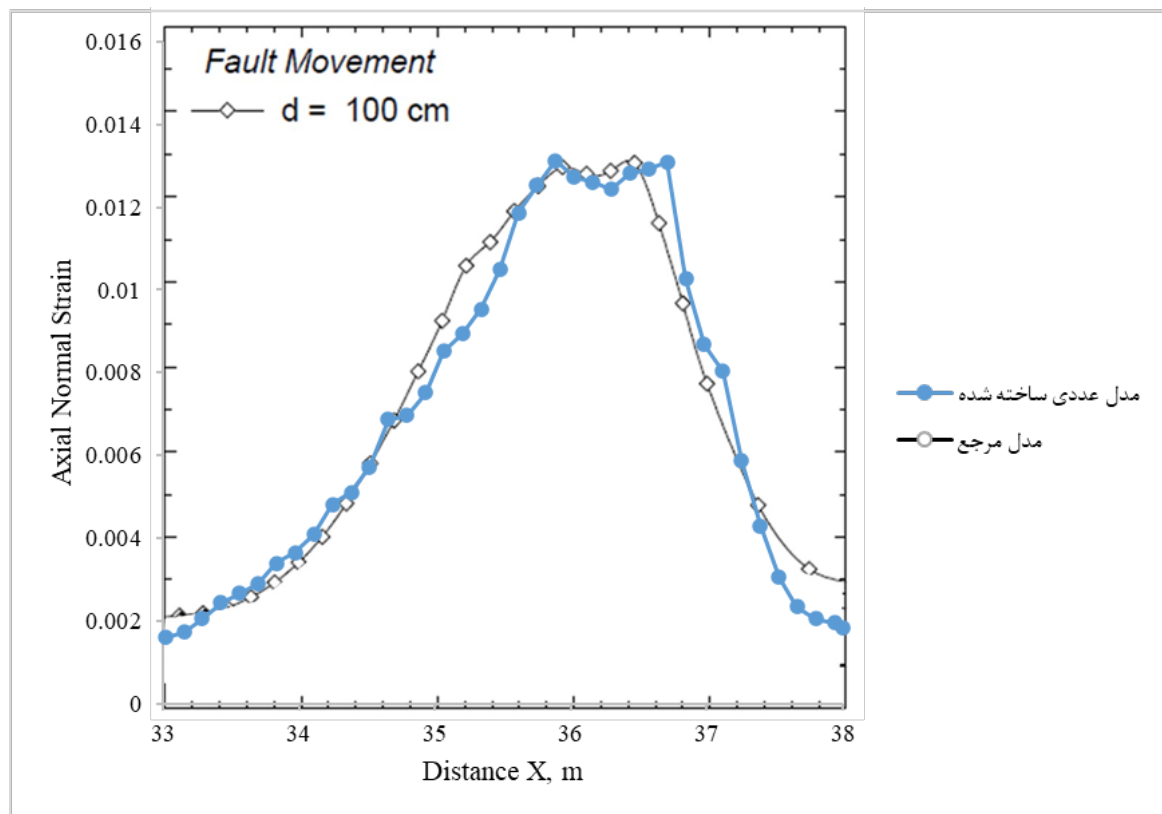
(۴) به شرح مقابل می باشد. برای این کار ابتدا در رابطه (۶) و با توجه به زاویه

تقاطع ۴۵ درجه خط لوله و گسل، داریم:

جدول ۴. مقادیر کرنش متوسط به دست آمده از رابطه (۴)

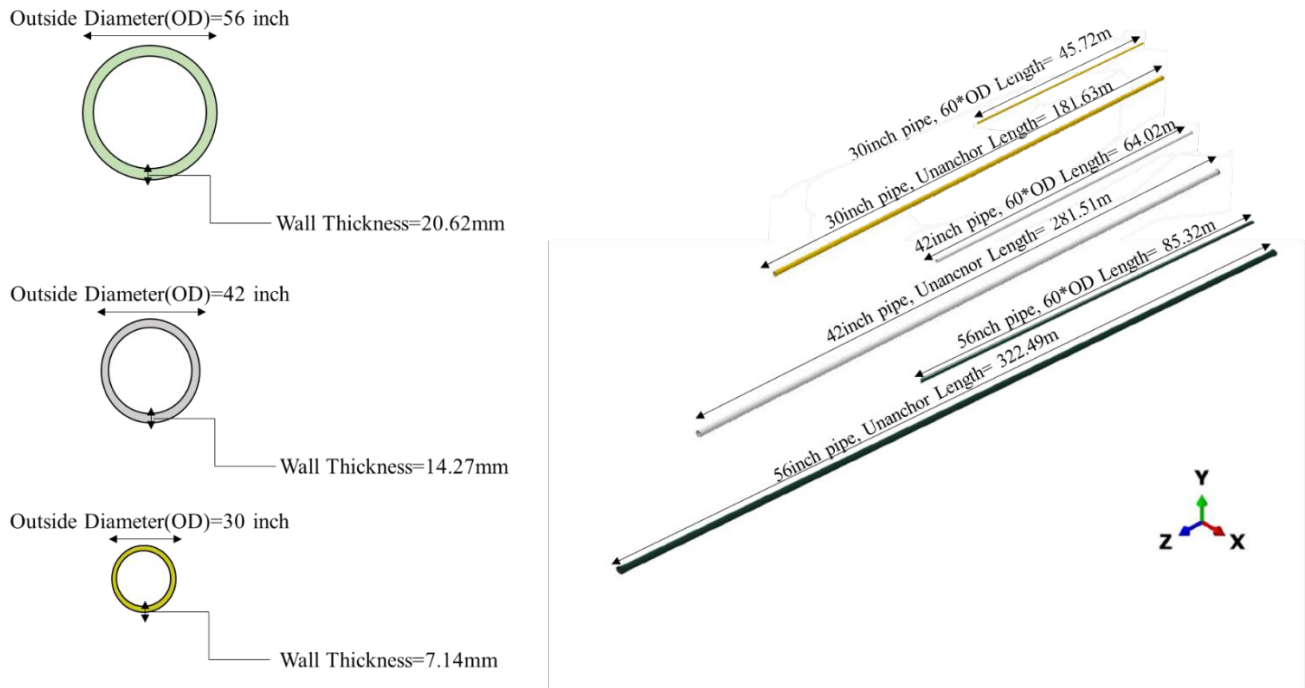
Table 4. Average standards pipe strain due to fault movement (Eq 4)

قطر خط لوله	نوع طول لوله	کرنش متوسط آیین‌نامه‌ای
inch۳۰	۶۰ برابر قطر لوله	۰/۰۱۵۵
	طول مهار نشده	۰/۰۰۳۸
inch۴۲	۶۰ برابر قطر لوله	۰/۰۱۱
	طول مهار نشده	۰/۰۰۲۴
inch۵۶	۶۰ برابر قطر لوله	۰/۰۰۸۲۹
	طول مهار نشده	۰/۰۰۲۱۹۳



شکل ۲. مقایسه نمودار کرنش کششی محوری موجود در مرجع [۸] و مدل عددی ساخته شده جهت صحت‌سنجی

Fig. 2. Validation of FE analysis with Vazouras results [8]



شکل ۳. مدل خط لوله در آباکوس

Fig. 3. Pipeline finite element model

جدول ۵. مشخصات لوله فولادی

Table 5. Mechanical properties of API5L-X70 steel used in the finite element analysis

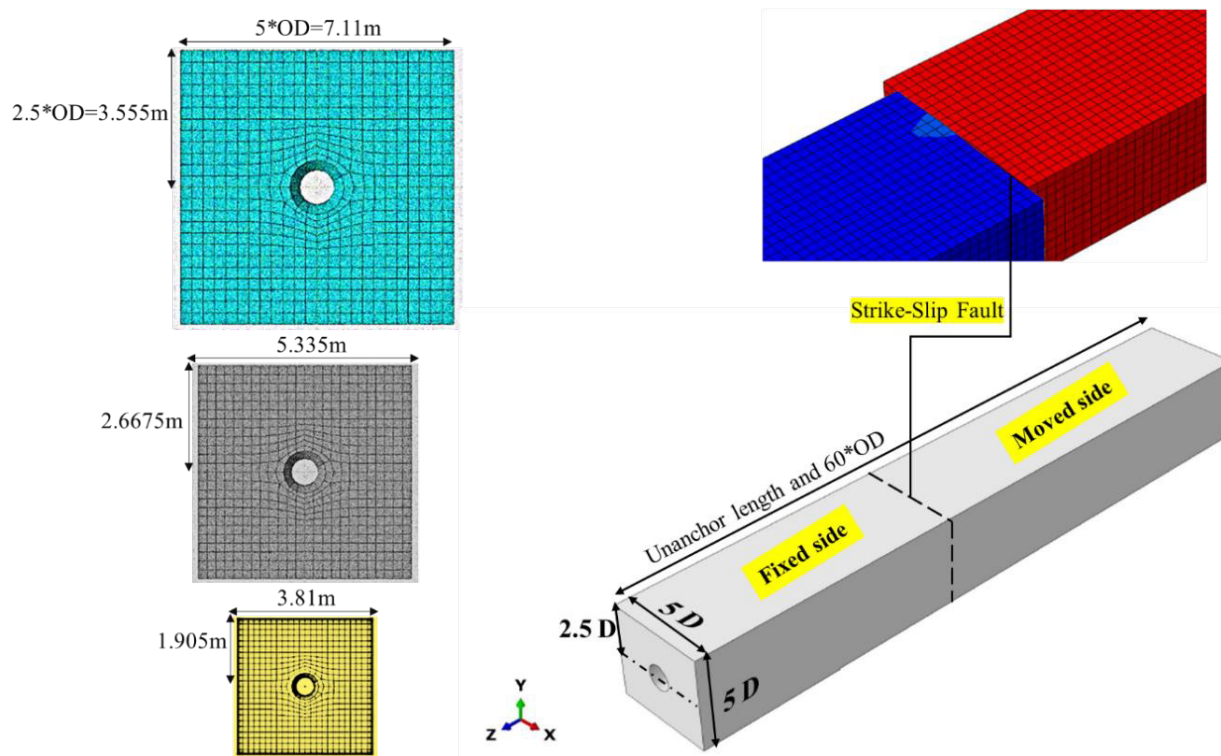
API5L- X70 Pipe	
تنش تسلیم (MPa)	۴۸۵
تنش گسیختگی (MPa)	۵۵۰
کرنش تسلیم (%)	۰/۲۳
کرنش گسیختگی (%)	۳
مدول یانگ (GPa)	۲۱۰
نسبت پواسون	۰/۳
چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۷۸۵۰

## ۵- مدل سازی نمونه ها

برای اطمینان از صحت نحوه مدل سازی ابتدا مدلهایی با توجه به نتایج مرجع [۸] در آباکوس ایجاد گردید و نتایج به دست آمده با نمودارهای موجود در مرجع ذکر شده صحت سنجی گردید که نتایج آن در نمودار شکل ۲ آورده شده است. بر مبنای مقایسه نمودارهای شکل ۲، از صحت نتایج مدل های عددی پژوهش حاضر، با تقریب قابل پذیرشی، اطمینان حاصل

گردید. به دلیل اینکه مدل ها برای جابجایی یک متری اعتبارسنجی شده اند تمامی مدل های این تحقیق به میزان یک متر تحت جابجایی گسل امتداد لغز قرار می گیرند.

جهت مدل نمودن لوله در محیط نرم افزار آباکوس، از نوع تغییر شکل پذیر المان پوسته (Shell) با ابعاد نشان داده شده در شکل ۳ که قبلا در جدول ۳ آورده شد، استفاده گردیده است. در این پژوهش، مشخصات لوله فولادی در تطابق با استاندارد API 5L [۲۶] از نوع لوله های PSL2



شکل ۴. مدل بلوک خاک در آبکوس

Fig. 4. Soil model (fault model)

گسل، یکی از بلوک‌های خاک، ثابت و بلوک دیگر متحرک منظور گردیده است. برای شبیه‌سازی رفتار پلاستیک خاک به جهت تعیین طول مناسب لوله، از داده‌های آزمایشگاهی مطابق با مرجع [۲۷] استفاده گردید.

برای شبیه‌سازی رفتار خاک به جهت تعیین مدل رفتاری خاک مناسب، بر اساس خاک ماسه‌ای انتخاب شده، ۳ مدل متداول موهر-کلمب، دراگر-پراگر و دراگر-پراگر اصلاح شده استفاده گردید. برای مدل موهر-کلمب از مشخصات موجود در جدول ۲ و برای سایر مدل‌های رفتاری از پارامترهای موجود در جداول ۶ و ۷ استفاده گردید. همچنین، برای سطح تسلیم دراگر-پراگر رفتار سخت شونده خطی و برای مدل رفتاری دراگر-پراگر اصلاح شده پارامتر سخت شونده کلاسیک در نرم‌افزار تعریف گردید.

نیروهای ایجاد شده در لوله در هنگام حرکت گسل امتداد لغز تا حد زیادی به زاویه تقاطع گسل و لوله مربوط می‌شود. شکل ۵ تجزیه بردار جابجایی وارده از گسل امتداد لغز به خط لوله را نشان می‌دهد. در زوایای تقاطع

دارای درز جوش مستقیم (SAWL) و رده مقاومتی X70 منظور شده است. جزئیات مشخصات مکانیکی لوله منظور شده در مدل خط لوله، در جدول ۵ ارائه گردیده است.

مشخصات منظور شده برای خاک پیرامونی خط لوله در این پژوهش، بر مبنای مشخصات فنی خاک مناسب برای عملیات خاکریزی پس از لوله‌گذاری (Backfill)، مطابق مرجع [۲۷] در جدول ۲ ارائه گردیده است. جهت حصول اطمینان از عدم وقوع کمانش تیری و بیرون زدگی لوله از خاک، طبق الزامات آیین‌نامه‌های ALA [۲۱] و ASM [۲۲] عمق دفن لوله معادل ۲/۵ برابر قطر لوله برای قطرهای مختلف انتخاب گردید. بر این اساس، مطابق شکل ۴، سطح مقطع بلوک خاک برای نمونه‌های این پژوهش، به صورت مربع با ابعاد پنج برابر قطر لوله، در نظر گرفته شد. همچنین خاک پیرامون خط لوله به صورت دو بلوک مجزا و با استفاده از نوع تغییر شکل پذیر المان Solid مدل گردیده و جهت شبیه‌سازی جابه‌جایی

جدول ۶. مشخصات وارده به نرم‌افزار برای مدل رفتاری دراگر-پراگر خاک

Table 6. Drucker-Prager material properties

نسبت تنش جریان	زاویه اتساع	زاویه اصطکاک
۱	.	۴۰/۰۱

جدول ۷. مشخصات مورد استفاده برای مدل رفتاری دراگر-پراگر اصلاح شده (کپ) خاک

Table 7. Cap plasticity material properties

Cap plasticity	
چسبندگی خاک	۳۰۰۰۰
زاویه اصطکاک	۵۸/۶
پارامتر خروج از کلاهک	۰/۱
موقعیت سطح تسلیم اولیه	.
پارامتر شعاعی سطح انتقال	.
نسبت تنش جریان	۱

بلوک متحرک) منظور گردید. در این پژوهش، اندرکنش خاک و لوله به کمک قابلیت پیش فرض موجود در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی گردید؛ در این روش مدل‌سازی، سطوحی از مدل که سطح تماس محسوب گردیده و دارای اندرکنش با سایر سطوح می‌باشند شناسایی و بعد از تعیین ماهیت و نوع اندرکنش میان دو سطح، نوع تماس مناسب در محیط نرم‌افزار تعریف گردید. در مدل‌های عددی این پژوهش، دو سطح دارای اندرکنش وجود دارد. اندرکنش اول، میان خاک پیرامونی و لوله مطابق شکل ۶ قسمت الف و اندرکنش دوم، میان قطعه ثابت و متحرک خاک همانند شکل ۶ قسمت ب وجود دارد. برای اندرکنش بین خاک و لوله از روش تماس سطح به سطح<sup>۲</sup> و با در نظر گرفتن مؤلفه مماسی<sup>۳</sup> و عمودی تماس<sup>۴</sup>، استفاده شده است. لغزش و جدا شدن خاک و لوله در مؤلفه مماسی، با استفاده از روش پنالتی تعریف می‌شود. ضریب پنالتی در این حالت، طبق آیین‌نامه ALA،  $\tan \delta$  در نظر گرفته می‌شود که در آن،  $\delta = \varphi f$  است. سقف مجاز این ضریب ۰/۵ می‌باشد که در آن،  $f$  ضریب اصطکاک بین خاک و لوله (بر حسب

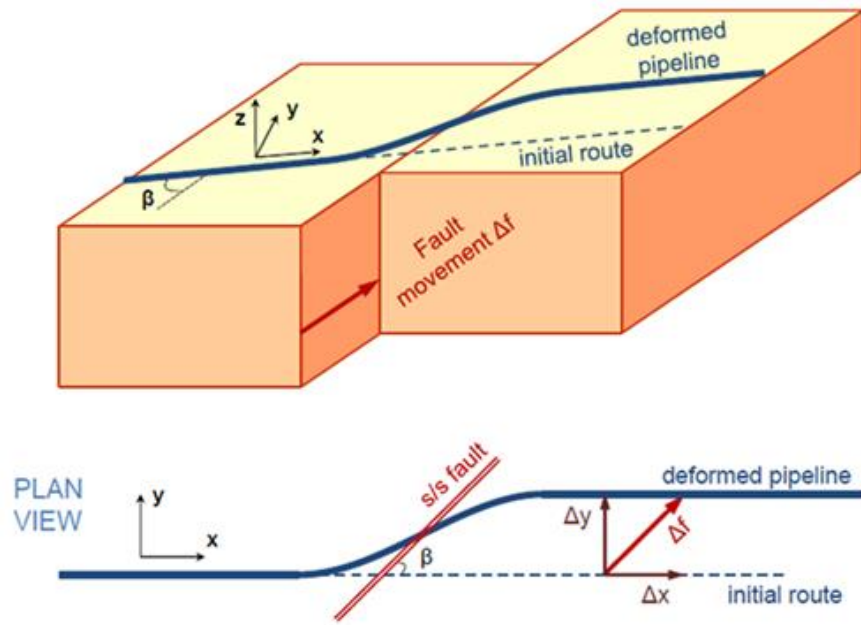
بزرگ‌تر از صفر تا ۴۵ درجه، به علت بزرگ‌تر بودن مؤلفه افقی جابجایی (بزرگ‌تر بودن مقدار کسینوس زاویه در زوایای کوچک)، خط لوله تحت نیروی غالب محوری قرار می‌گیرد و در جابجایی پایین‌تری از گسل امتداد لغز دچار گسیختگی می‌شود. از طرفی در زوایای تقاطع بزرگ‌تر از ۴۵ درجه تا ۹۰ درجه، به علت مشابه، خط لوله تحت نیروی خمشی غالب قرار می‌گیرد. در این حالت عمده نیروی وارده بر لوله در جهت عمود بر امتداد طولی لوله می‌باشد [۲۸ و ۲۹]. به دلیل اینکه در زاویه تقاطع ۴۵ درجه با گسل امتداد لغز، خط لوله تحت نیروهای شدید محوری و خمشی قرار نمی‌گیرد، در نتیجه در کلیه مدل‌های عددی این پژوهش از این زاویه جهت زاویه برخورد لوله با گسل امتداد لغز استفاده شده است.

تحلیل مورد استفاده در این پژوهش از نوع شبه استاتیکی بوده و با استفاده از حل گر دینامیکی ضمنی (غیر صریح<sup>۱</sup>) در دو گام انجام می‌گیرد. ابتدا به جهت ایجاد شرایط تنش بر جا نیروی جاذبه به کل مدل وارد گردید و در مرحله بعد، مدل تحت جابه‌جایی یک متری با زاویه تقاطع ۴۵ درجه با گسل امتداد لغز قرار گرفت. برای شبیه‌سازی حرکت گسل، مدل سه بعدی خاک پیرامونی به صورت ترکیب دو بلوک مستقل (یک بلوک ثابت و یک

1 . Dynamic implicit

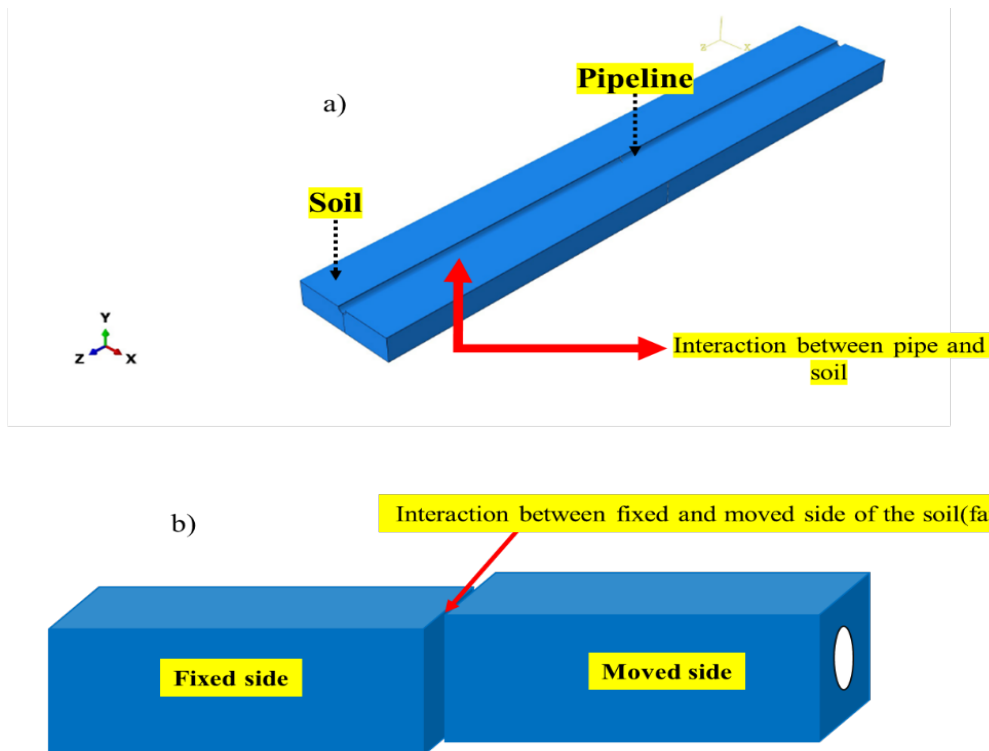
2 . Surface to surface  
3 . Tangential  
4 . Normal





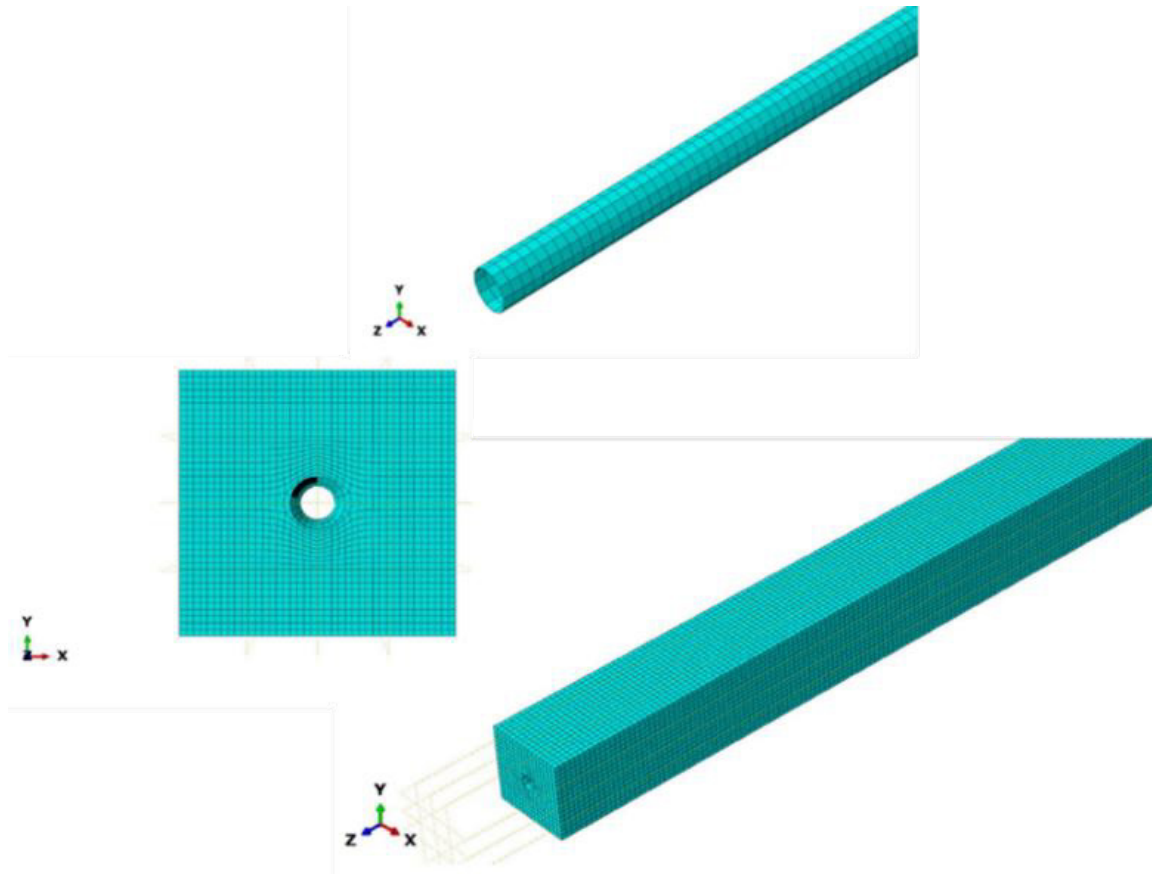
شکل ۵. تجزیه بردار جابجایی گسل [۲۸]

Fig. 5. Pipe movement at crossing strike-slip fault [28]



شکل ۶-الف. اندرکنش اول، میان خاک پیرامونی و لوله -ب. اندرکنش دوم، میان قطعه ثابت و متحرک خاک

Fig. 6. Interaction a) between pipe and soil b) between fixed and moved side of the soil(fault)



شکل ۷. مش بندی لوله و مش بندی خاک در نرم افزار آباکوس

Fig. 7. Finite element mesh of steel pipeline and soil

بخش استوانه‌ای لوله و از عنصر حجمی توپر C3D8R برای شبیه‌سازی خاک پیرامونی لوله، استفاده شده است. برای جلوگیری از تغییر و نوسان زیاد در نتایج، به علت تغییر در اندازه مش، علی‌رغم افزایش مدت زمان تحلیل، از مش دارای اندازه یکسان در تمام مدل (هم در خاک و هم در لوله)، استفاده شده است. بر این اساس لوله از اجزایی به طول ۰/۲۵ و خاک از اجزایی به طول ۰/۵ مطابق شکل ۷ مش بندی شد.

#### ۶- نتایج تحلیل عددی

##### ۶-۱- تعیین طول مناسب لوله

پس از انجام تحلیل، به جهت تعیین طول بهینه برای مدل‌سازی، کرنش برای مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار (مدل‌های شماره ۱ تا ۶ در جدول ۸) استخراج گردید. نمودارهای شکل ۸ کرنش متناظر با یک متر جابه‌جایی گسل امتداد لغز را بر روی لوله‌های انتخابی این پژوهش در خاک ماسه‌ای در طول‌های مختلف را نشان می‌دهند.

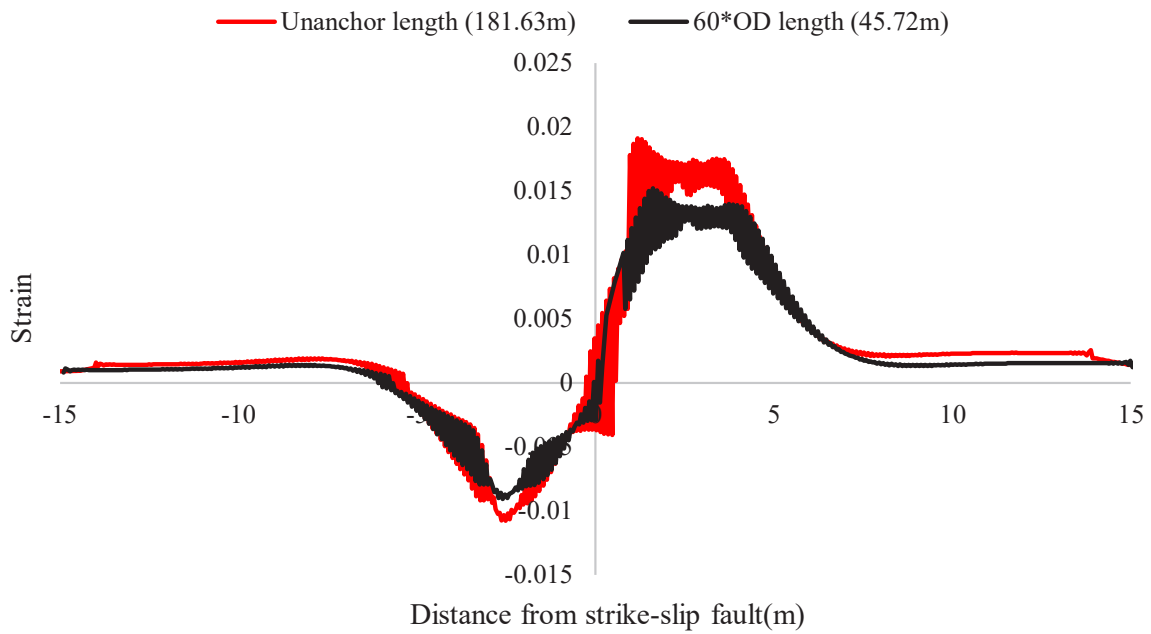
نوع پوشش لوله، طبق جدول (۱) و  $\varphi$ ، زاویه اصطکاک داخلی خاک (طبق جدول ۲) می‌باشد. مقدار این ضریب در این پژوهش، به دلیل عبور از محدوده مجاز برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. برای مؤلفه عمودی که تماس نرمال نیز نام دارد از خاصیت تماس سخت<sup>۱</sup> پیش فرض آباکوس، استفاده شده است. این خاصیت، باعث جلوگیری از نفوذ و داخل هم رفتن المان‌ها و صفحات موجود در مرز تماس دو سطح می‌شود. برای اندرکنش بین بلوک ثابت و متحرک خاک نیز به مانند بالا، از روش تماس سطح به سطح و با در نظر گرفتن مؤلفه مماسی و عمودی تماس استفاده شده است. با این تفاوت که ضریب پنالتی در این حالت برابر با  $\tan \varphi$  می‌باشد.

جهت مش بندی خاک و لوله، از مش بندی پیش فرض نرم‌افزار با عنوان Structure استفاده شده است. از عنصر پوسته‌ای S4R جهت شبیه‌سازی

1 . Hard Contact

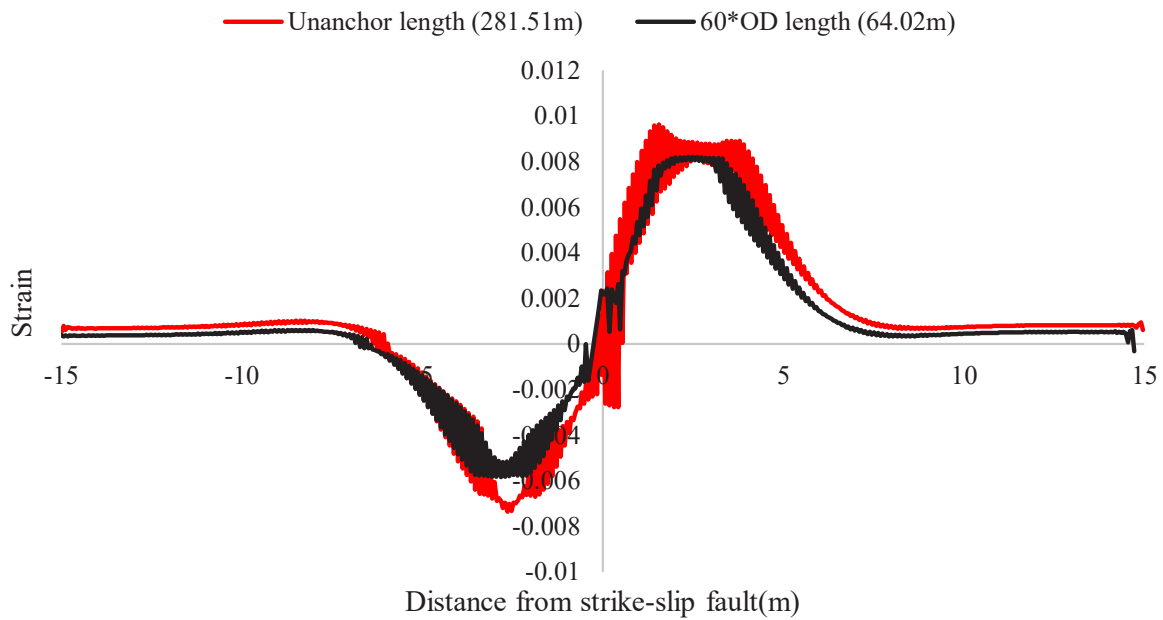
a)

الف) لوله ۳۰ اینچ



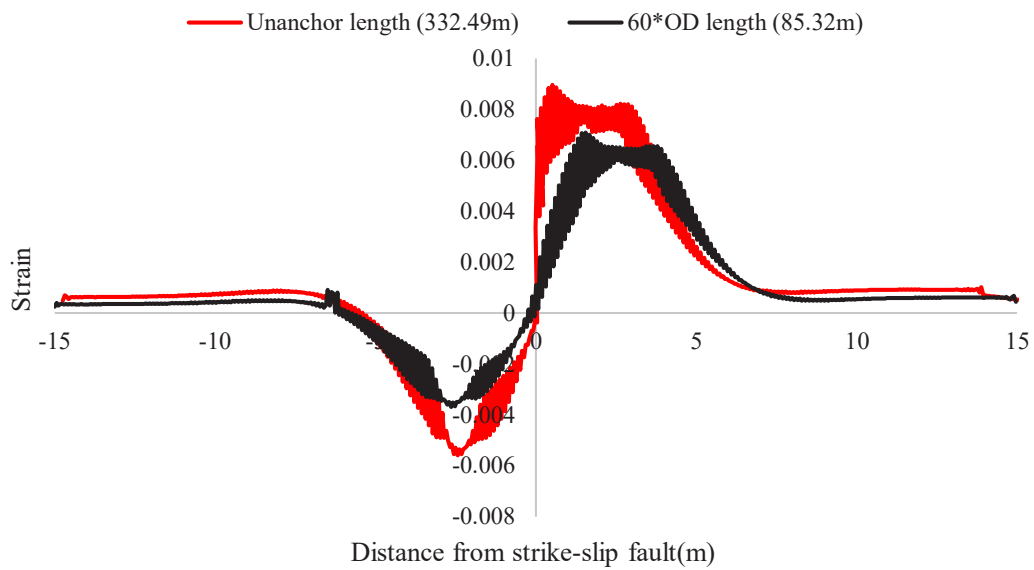
b)

ب) لوله ۴۲ اینچ



c)

پ) لوله ۵۶ اینچ



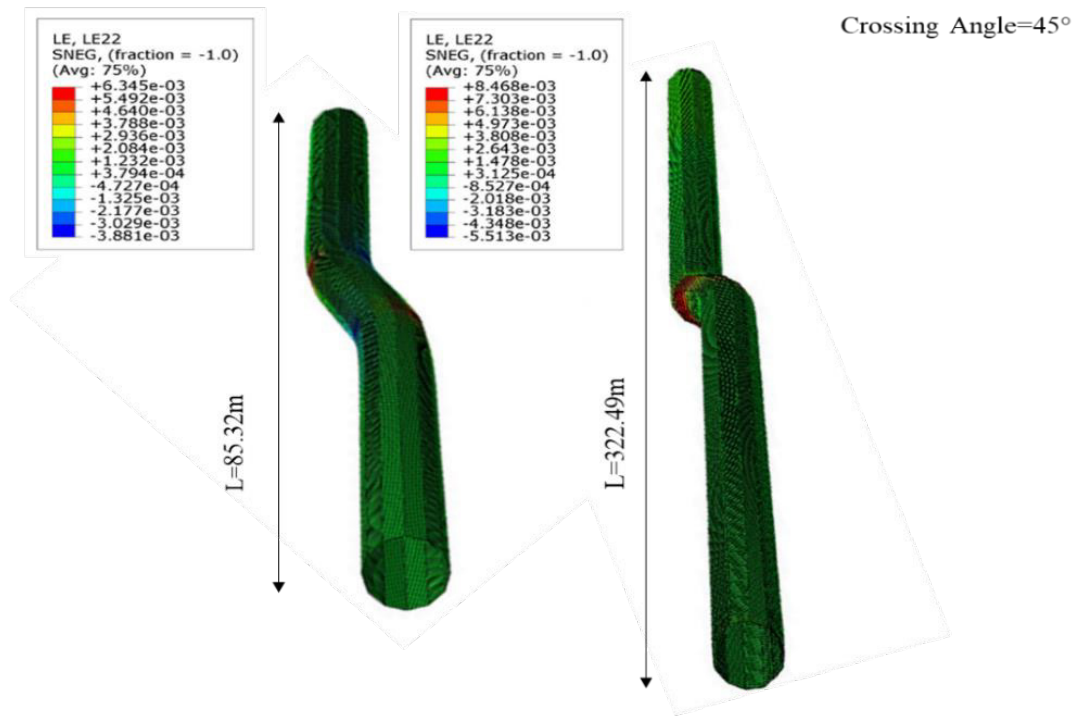
شکل ۸. نمودار کرنش رخ داده در خط لوله بر حسب فاصله از گسل الف) لوله ۳۰ اینچ ب) لوله ۴۲ اینچ پ) لوله ۵۶ اینچ

Fig. 8. Maximum strains in pipes obtained from FE analysis: a)30inch pipe b)42inch pipe c)56inch pipe

جدول ۸. مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس

Table 8. Numerical models created for this research in ABAQUS

مدل رفتاری خاک	طول لوله (متر)	ضخامت مدل لوله (میلی متر)	قطر مدل لوله (اینچ)	ردیف	مدل‌سازی جهت
داده‌های آزمایشگاهی مرجع	۴۵/۷۲	۷/۱۴	۳۰	۱	تعیین طول مناسب خط لوله
	۱۸۱/۶۳			۲	
	۶۴/۰۲	۱۴/۲۷	۴۲	۳	
	۲۸۱/۵۱			۴	
	۸۵/۳۲	۲۰/۶۲	۵۶	۵	
	۳۲۲/۴۹			۶	
موهر-کلمب دراکر-پراگر دراکر-پراگر اصلاح شده	طول بهینه حالت قبل	۷/۱۴	۳۰	۷	تعیین مدل رفتاری مناسب خاک
				۸	
				۹	
	طول بهینه حالت قبل	۱۴/۲۷	۴۲	۸	
				۹	
				۹	
	طول بهینه حالت قبل	۲۰/۶۲	۵۶	۹	
				۹	
				۹	



شکل ۹. تغییر شکل لوله ۵۶ اینچ در مدل دارای طول ۶۰ برابر قطر و طول مهار نشده خط لوله

Fig. 9. Longitudinal deformation of 56inch pipe with 60\*OD length and with unanchored length

جدول ۹. مقایسه کرنش به دست آمده از تحلیل عددی و آیین نامه

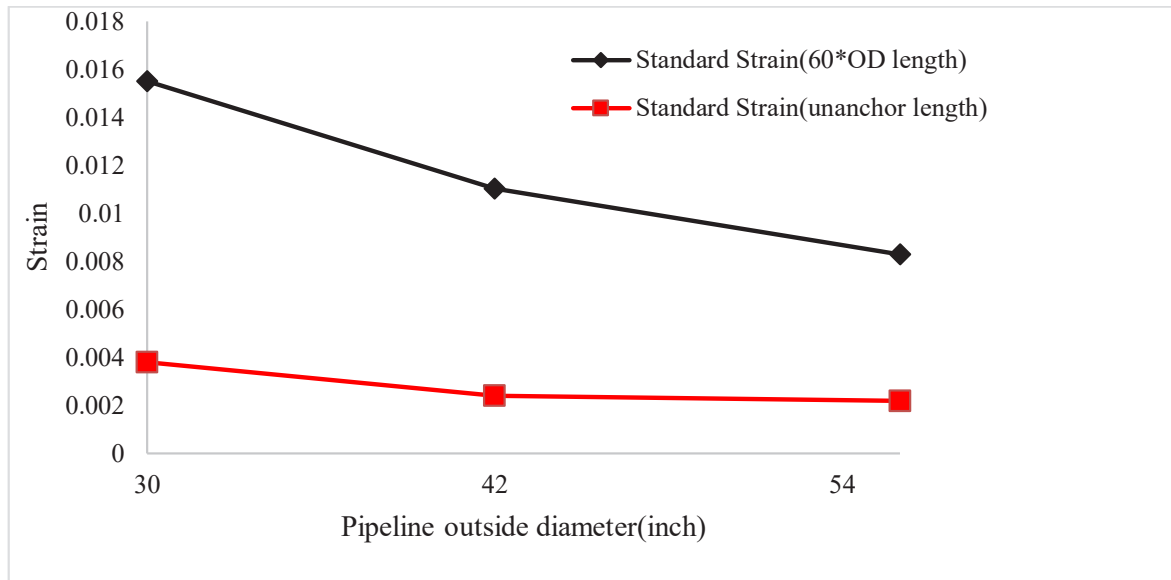
Table 9. Comparison of average standards pipe strain (Eq4) and the average strain obtained from FE analysis

ردیف مدل	قطر مدل لوله (اینچ)	طول لوله (متر)	کرنش متوسط آیین نامه (رابطه ۴)	کرنش متوسط تحلیل عددی
۱		۴۵/۷۲	۰/۰۱۵۵۱	۰/۰۰۱۱۰
۲	۳۰	۱۸۱/۶۳	۰/۰۰۳۸۰	۰/۰۰۳۳۲
۳		۶۴/۰۲	۰/۰۱۱۰۳	۰/۰۰۱۹۱
۴	۴۲	۲۸۱/۵۱	۰/۰۰۲۴۰	۰/۰۰۲۶۷
۵		۸۵/۳۲	۰/۰۰۸۲۹	۰/۰۰۰۷۴
۶	۵۶	۳۲۲/۴۹	۰/۰۰۲۱۹	۰/۰۰۱۳۵

آیین نامه ای مقایسه می شود. نتایج مربوط به محاسبه کرنش بر مبنای رابطه آیین نامه و تحلیل عددی در نرم افزار آباکوس برای هر دو حالت طول لوله (۶۰ برابر قطر و طول مؤثر مهار نشده) برحسب قطرهای انتخابی در جدول ۹ ارائه شده اند:

همچنین شکل ۹ تغییر شکل لوله ۵۶ اینچ برای هر دو طول لوله را در آباکوس نشان می دهد.

پس از به دست آوردن نمودار و مقادیر کرنش محوری برای مدل ها، متوسط کرنش لوله در محل برخورد با گسل در هر مدل عددی با مقادیر



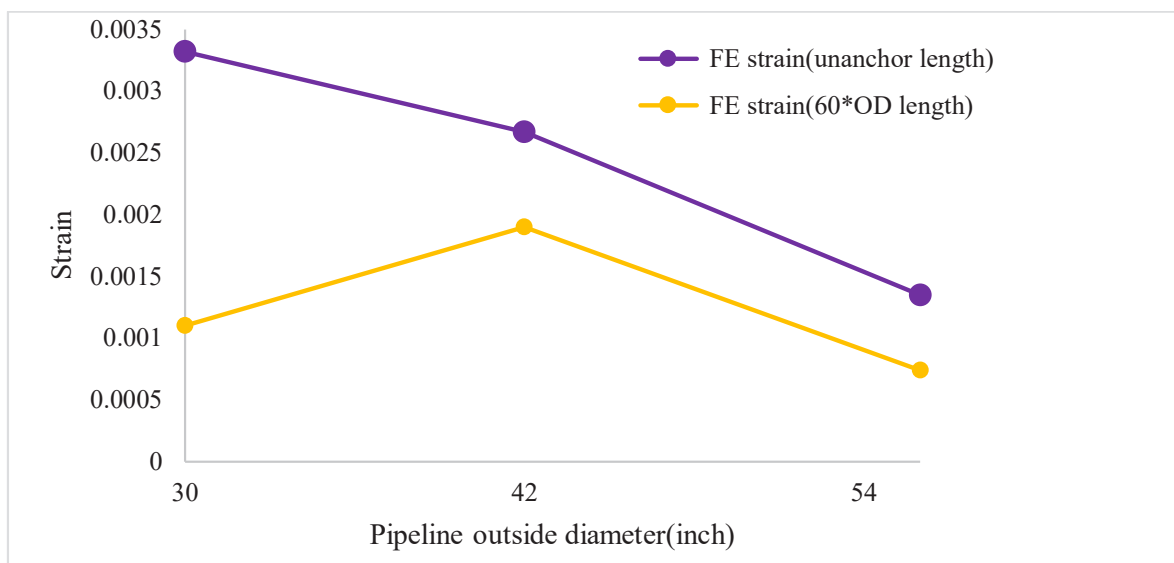
شکل ۱۰. تغییرات کرنش متوسط آیین‌نامه‌ای برحسب قطر در مدل‌های دارای طول ۶۰ برابر قطر و طول مهار نشده خط لوله

Fig. 10. Standard average strain in terms of diameter in models

که در کارگاه‌های پروژه‌های انتقال استفاده می‌شود در نظر گرفته نمی‌شود، نتایج تحلیل قطعا با خطا همراه است و یا بسیار دور از واقعیت می‌باشد. اختلاف کرنش متوسط حدودا ۱۰ برابری میان تحلیل عددی و آیین‌نامه در مدل‌های ردیف ۱ و ۳ و ۵ در جدول ۹ ناشی از این اتفاق است. همچنین، با افزایش قطر لوله میزان کرنش وارده بر لوله تحت جابجایی یکسان گسل کاهش می‌یابد. این امر به علت افزایش مقاوت در پی افزایش قطر لوله رخ می‌دهد [۲۹]. مطابق کرنش‌های آیین‌نامه‌ای به دست آمده در جدول ۹ و نمودار شکل ۱۰، این روند برای کرنش متوسط لوله در محل گسل نیز صادق است (تمامی مدل‌ها)، به طوری که در لوله‌ی ۳۰ اینچ با طول ۱۸۱/۶۳ متر (ردیف ۲) مقدار کرنش متوسط آیین‌نامه برابر ۰/۳۸ درصد و در لوله‌ی ۵۶ اینچ با طول ۳۲۲/۴۹ متر (ردیف ۶) این مقدار برابر ۰/۲ درصد می‌باشد. در کرنش‌های به دست آمده از تحلیل عددی، این روند فقط برای مدل‌های دارای طول مهار نشده (ردیف ۲ و ۴ و ۶ در جدول ۹) برقرار است. یعنی در سایر مدل‌ها، با افزایش قطر لوله با افزایش کرنش رخ داده در لوله مواجه هستیم (کرنش عددی ردیف ۱ و ۳). نمودار شکل ۱۱ بیانگر توضیحات فوق می‌باشد. در خصوص اثر افزایش ضخامت در لوله‌ها نیز با توجه به کاهش کرنش لوله در ضخامت‌های بیشتر به مانند اثر قطر لوله شاهد افزایش کرنش با افزایش ضخامت در مدل‌های دارای طول ۶۰ برابر قطر هستیم.

به طور کلی هر چه طول لوله بزرگ‌تر شود میزان ماکزیمم کرنش رخ داده در لوله تحت اثر حرکت گسل (در جابجایی یکسان) کمتر می‌گردد [۲۹]. مطابق کرنش‌های آیین‌نامه‌ای به دست آمده در جدول ۹ این روند برای کرنش متوسط لوله در محل گسل نیز صادق است، به طوری که در لوله‌ی ۳۰ اینچ با طول ۴۵/۷۲ متر (ردیف ۱ در جدول ۹) مقدار کرنش متوسط آیین‌نامه برابر ۱/۵۵ درصد و در مدل دارای طول بیشتر (ردیف ۲) برابر ۰/۳۸ درصد می‌باشد. در سایر قطرهای انتخابی (ردیف ۳ و ۴ و ۵ و ۶ در جدول ۹) نیز مسئله فوق‌الاشاره مشهود است. در کرنش‌های به دست آمده از تحلیل عددی اما، این روند برقرار نیست یعنی با افزایش طول مدل، به جای کاهش مقدار کرنش متوسط با افزایش آن روبرو هستیم. به این معنی که به عنوان مثال در مدل‌های ردیف ۱ و ۲، کرنش متوسط تحلیل عددی در لوله با طول بزرگ‌تر بیشتر است. در سایر مدل‌ها نیز شرایط به همین روال است. علت این امر آن است که در آیین‌نامه‌ها و استانداردهای متداول خطوط لوله همواره به استفاده از طول مهار نشده جهت هر گونه مدل‌سازی و طراحی تاکید شده و سایر حالات مورد پذیرش واقع نمی‌گردد. در نتیجه، همانطور که پیداست محدود نمودن طول خط لوله به ۶۰ برابر قطر لوله، در نتایج حاصله تأثیرگذار و باعث بروز خطا در نتایج می‌شود. به عبارت دیگر هنگام مدل‌سازی یا طراحی خطوط انتقال، اگر بعد طولی لوله را هر مترآزی به جز طول مهار نشده در نظر بگیریم، به علت آن که اثر بلوک‌های مهار





شکل ۱۱. تغییرات کرنش متوسط تحلیل عددی برحسب قطر در مدل‌های دارای طول ۶۰ برابر قطر و طول مهار نشده خط لوله

Fig. 11. FE analysis average strain in terms of diameter in models

متداول جهت شبیه‌سازی سطوح تسلیم خاک استفاده شده است و به همین جهت محل وقوع کرنش‌های ماکزیمم و نیز شکل نمودار کرنش لوله (تیز بودن لبه‌ها) متفاوت می‌باشد. ضمناً در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که هر چه قطر لوله کاهش یابد مکان حداکثر کرنش کششی و فشاری از یکدیگر دور می‌شوند. علت این اتفاق تغییر شکل زیاد لوله حین گسلش در قطرهای کوچک به علت افزایش میزان کرنش وارده می‌باشد. به عبارت دیگر مطابق شکل ۱۳ قسمت الف، در لوله ۳۰ اینچ به علت کوچک‌تر بودن قطر و ضخامت انتخابی نسبت به لوله ۵۶ اینچ، مقاومت لوله کمتر است و کرنش بیشتری را در جابجایی یکسان متحمل می‌شود. در نتیجه میزان تغییر شکل لوله در محل گسلش نیز بیشتر و در این صورت بین مکان حداکثر کرنش‌ها فاصله می‌افتد. تغییر شکل ایجاد شده در لوله ۳۰ اینچ مطابق شکل ۱۳ قسمت ب، شکل مقطع لوله را از حالت دایره‌ای تا مرز بیضوی شدن در محل گسلش پیش می‌برد.

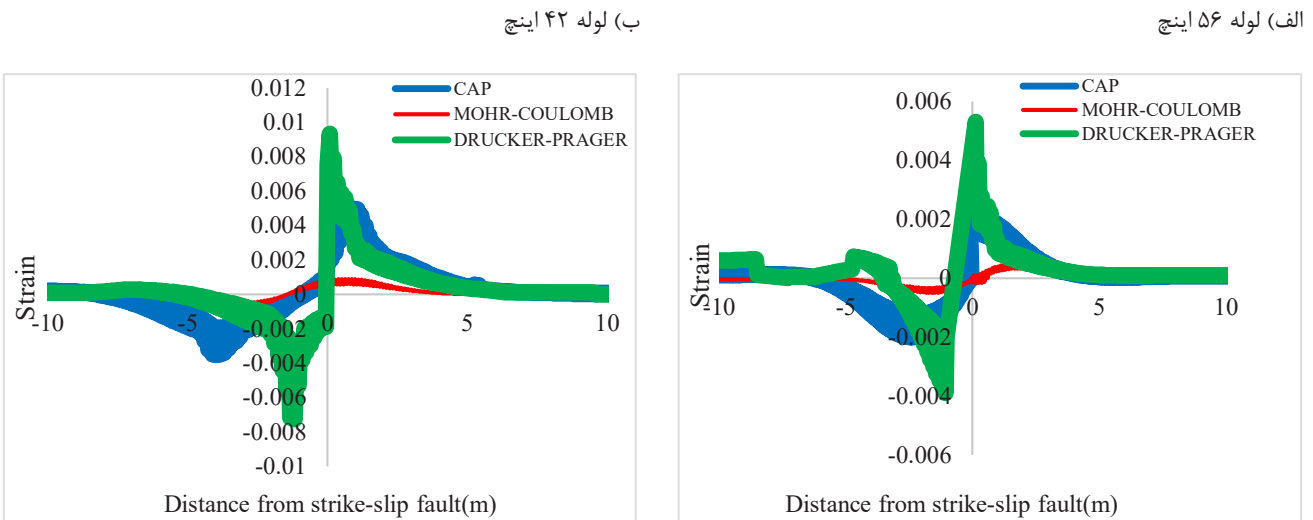
بررسی کرنش‌های متوسط به دست آمده از تحلیل عددی موجود در جدول ۱۰ نشان می‌دهد که در همه حالات کرنش به دست آمده در حالتی که سطح تسلیم خاک با مدل موهر-کلمب شبیه‌سازی شده دارای اختلاف زیاد با کرنش آیین‌نامه‌ای است. علت این اختلاف در واقع به ماهیت این مدل رفتاری بر می‌گردد. در این معیار سطوح تسلیم در فضای تنش‌های اصلی

در نهایت بررسی نتایج به دست آمده بیانگر آن است که، نتایج کرنش متوسط مدل با طول مهار نشده به کرنش متوسط به دست آمده از آیین‌نامه (رابطه ۴) نزدیک‌تر است و به همین جهت و به علل فوق‌الذکر طول مهار نشده خط لوله به عنوان طول مناسب جهت مدل‌سازی بعد طولی لوله انتخاب می‌گردد. به همین منظور شایسته است در شبیه‌سازی‌ها بر حسب مشخصات محل از این طول جهت مدل‌سازی لوله استفاده گردد.

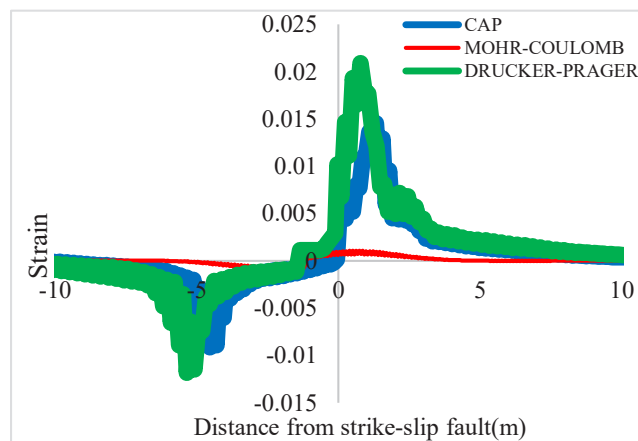
#### ۶-۲- تعیین مدل رفتاری مناسب خاک

پس از قرار دادن طول بهینه مرحله قبل در مدل‌های شماره ۷ تا ۹ جدول ۸، نمودار شکل ۱۲ برای مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار استخراج گردید. همچنین، نتایج مربوط به محاسبه کرنش بر مبنای رابطه آیین‌نامه که از بخش قبل برای طول مهار نشده محاسبه شد و تحلیل عددی در محیط نرم‌افزار آباکوس برای هر سه حالت مدل رفتاری خاک در جدول ۱۰ ارائه شده‌اند.

همانطور که ملاحظه می‌شود محل وقوع ماکزیمم کرنش فشاری (منفی) و کششی (مثبت) در نمونه‌های این قسمت (مدل ۷ تا ۹ جدول ۸) با مکان ماکزیمم نمودارهای بخش قبلی متفاوت است. در توضیح این موضوع ذکر این نکته که در این بخش برخلاف قسمت قبل، از مدل‌های رفتاری



پ) لوله ۳۰ اینچ

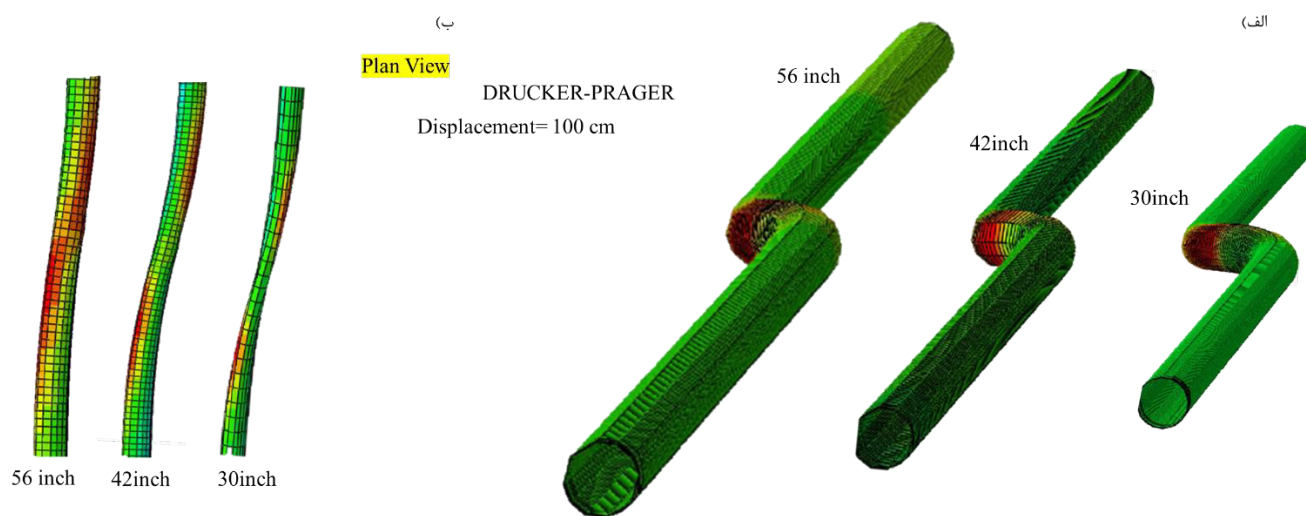


شکل ۱۲. نمودار کرنش رخ داده در خط لوله بر حسب فاصله از گسل با احتساب مدل‌های رفتاری گوناگون خاک

Fig. 12. Pipe strains for different plasticity behavior of soil obtained from FE analysis

کششی) محاسبه شوند از این رو جواب‌ها بیشتر از واقعیت محاسبه می‌شوند. به عبارت دیگر ممکن است خاک محل شرایط ایده آل معیار دراگر-پراگر را دارا نباشد [۳۱]. در نهایت در مدل کپ که به عنوان دراگر-پراگر اصلاح شده نیز از آن یاد می‌شود مشکلات قبلی کاملاً برطرف گردیده است. سرانجام با توجه به تقریب مناسب نتایج حاصل از مدل رفتاری دراگر-پراگر اصلاح شده یا کپ در مقایسه با نتایج حاصل از روابط آیین‌نامه‌ای، این مدل رفتاری جهت شبیه‌سازی مناسب رفتار خاک ماسه‌ای معرفی می‌گردد.

یک هرم به صورت یک شش ضلعی با قاعده باز که سه گوشه آن روی قاعده یک حجم مخروطی و سه گوشه دیگر در داخل مخروط است می‌باشد. به علت وجود نقاط تیز (گوشه) در محل برخورد وجوه هرم مرکزی، جواب‌ها دچار عدم یگانگی یا با خطای زیاد همراه می‌باشد [۳۰]. از طرفی در مدل رفتاری دراگر-پراگر مطابق شکل ۱۴، سطوح تسلیم به مانند یک بیضی واقع شده‌اند که وجود انحنا در آن مشکلات مدل موهر-کلمب را در جواب نهایی برطرف می‌سازد ولی به دلیل اینکه در معیار دراگر-پراگر حتماً باید زوایای اصطکاک داخلی خاک در آزمایش‌های سه محوره فشاری و توسعه جانبی



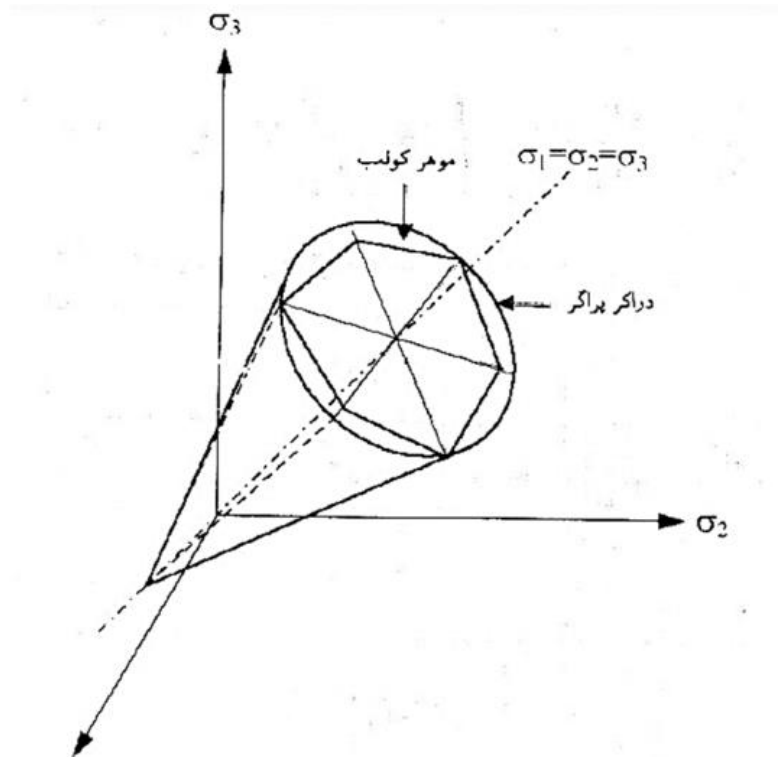
شکل ۱۳- الف. تغییر شکل خطوط لوله با احتساب مدل رفتاری دراگر-پراگر خاک از نمای روبرو ب. پلان تغییر شکل لوله‌ها

Fig. 13. Displacement profile of the pipeline in Drucker-Prager model a) from the front view b) plan view

جدول ۱۰. مقایسه کرنش به دست آمده از تحلیل عددی و آیین‌نامه برای حالات مختلف تسلیم خاک

Table 10. Comparison of strain obtained from numerical analysis and regulations (Eq4) for different plasticity behavior of soil

ردیف	قطر مدل لوله (اینچ)	طول لوله (متر)	کرنش متوسط آیین‌نامه (رابطه ۴)	مدل رفتاری خاک	کرنش متوسط تحلیل عددی
۷	۳۰	۱۸۱/۶۳	۰/۰۰۳۸۰	موهر-کلمب	۰/۰۰۰۹۵
				دراگر-پراگر	۰/۰۰۷۶۲
				دراگر-پراگر اصلاح شده	۰/۰۰۳۹۳
۸	۴۲	۲۸۱/۵۱	۰/۰۰۲۴۰	موهر-کلمب	۰/۰۰۰۶۸
				دراگر-پراگر	۰/۰۰۵۱۵
				دراگر-پراگر اصلاح شده	۰/۰۰۳۰
۹	۵۶	۳۲۲/۴۹	۰/۰۰۲۱۹	موهر-کلمب	۰/۰۰۰۴۳
				دراگر-پراگر	۰/۰۰۴۷۰
				دراگر-پراگر اصلاح شده	۰/۰۰۲۸۵



شکل ۱۴. سطوح تسلیم معیار موهر-کلمب و دراگر-پراگر [۳۰]

Fig. 14. Mohr-Coulomb and Drucker-Prager's yielding and plasticity theory

## ۷- جمع‌بندی

خطوط انتقال در مسیر خود همواره از مناطق فعال لرزه‌ای عبور می‌کنند. به همین جهت پژوهشگران بسیاری به تحلیل عددی خطوط لوله در محل عبور از انواع گسل‌ها پرداخته‌اند. در همین راستا، مرور ادبیات فنی مربوطه بیانگر آن است که در مدل‌سازی‌های پیشین، هر یک از محققین از مشخصات ابعادی و رفتاری متفاوتی در خصوص لوله‌های مدفون مواجه با جابجایی گسل استفاده نموده‌اند. به بیان بهتر انتخاب مشخصات جهت شبیه‌سازی، بدون پشتوانه علمی و صرفاً به منظور ساده‌سازی تحلیل عددی صورت پذیرفته است. به همین جهت نتایج حاصله طبیعتاً می‌تواند بسیار محافظه کارانه یا با خطا روبرو گردد. از طرفی آیین‌نامه‌ها و استانداردهای متداول خطوط لوله نیز به عنوان مراجع اصلی ضوابط خاصی را در این موارد اعلام می‌دارند. به همین دلیل لازم بود تا ابهام مطرح در این زمینه رفع و بهترین مشخصات ابعادی و رفتاری برای مدل‌سازی خطوط مدفون در تقاطع با گسل انتخاب گردد. لذا طی این پژوهش، با کمک مدل‌های عددی گوناگونی که در نرم‌افزار آباکوس ساخته شد و با استفاده از ضوابط موجود در استانداردهای متداول و همچنین مقایسه نتایج عددی با روابط آیین‌نامه‌ها،

طول مناسب برای نمونه لوله و مدل رفتاری مناسب برای خاک ماسه‌ای

تعیین و نتایج زیر به دست آمد:

۱- مشخص گردید می‌بایست برای مدل‌سازی عددی خطوط لوله، از طول موثر مهار نشده برای بعد طولی نمونه لوله استفاده نمود و منظور نمودن طول خط لوله در تناسب با قطر لوله (برای مثال، معادل ۶۰ برابر قطر لوله) یا سایر مقادیر تجربی اگر چه باعث کاهش حجم محاسبات و زمان تحلیل می‌شوند اما پشتوانه علمی نداشته و نتایج آن از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. بنابراین می‌بایست از این پس پژوهشگران این حوزه از طول مهار نشده که در اکثر آیین‌نامه‌ها نیز شرایط و نحوه محاسبه آن ذکر شده برای مدل‌سازی بعد طولی لوله استفاده نمایند.

۲- مدل‌های رفتاری گوناگونی جهت شبیه‌سازی رفتار خاک وجود دارند که متداول‌ترین آن‌ها سه مدل موهر کلمب، دراگر پراگر و دراگر پراگر اصلاح شده می‌باشند که با انجام این تحقیق مشخص گردید مدل دراگر پراگر اصلاح شده به عنوان نزدیک‌ترین و مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی رفتار خاک جهت مدل‌سازی، مطابق روابط آیین‌نامه‌ای می‌باشد.

- displacement, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21 (2014) 921-928.
- [12] O.V. Trifonov, Numerical stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active strike-slip faults with an emphasis on fault modeling aspects, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, (2015).
- [13] G.C. Sarvanis, S.A. Karamanos, P. Vazouras, Permanent earthquake - induced actions in buried pipelines : Numerical modeling and experimental verification, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (2017) 1-22.
- [14] X. Liu, H. Zhang, B. Wang, M. Xia, K. Wu, Q. Zheng, Y. Han, Local Buckling Behavior and Plastic Deformation Capacity of High-Strength Pipe at Strike-Slip Fault Crossing, *metals*, (2017).
- [15] R. Hassani, R. Basirat, A 3D numerical modeling of polyethylene buried pipes affected by fault movement, *Engineering Science and Technology an International Journal*, (2018) 0-6.
- [16] A. Vatani Oskouei, A. Tamjidi, P. Pourshabani, Effects of burial depth in the behavior of buried steel pipelines subjected to strike-slip fault, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 123 (2019) 252-264.
- [17] M. Shadab Far, N. Hassani, E.V. Muho, Empirical expressions for the maximum induced strain on buried steel pipelines crossing strike-slip faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116 (2019) 490-494.
- [18] S. Dey, S. Chakraborty, S. Tesfamariam, Structural performance of buried pipeline undergoing strike-slip fault rupture in 3D using a non-linear sand model, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 135 (2020) 106-180.
- [19] V.E. Melissianos, D. Vamvatsikos, C.J. Gantes, Methodology for failure mode prediction of onshore buried steel pipelines subjected to reverse fault rupture, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 135 (2020) 106-116.
- [20] D.S.S. Corp, ABAQUS, 2012.
- [1] N.M. Newmark, W.J. Hall, Pipeline design to resist large fault displacement, *Earthquake Engineering*, (1975) 416-425.
- [2] R.P. Kennedy, A.W. Chow, R.A. Williamson, Fault movement effects on buried oil pipeline, *Transp. Eng. J*, 103:TE5 (1977).
- [3] L.R.-I. Wang, Y.-H. Yeh, A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13 (1985) 75-96.
- [4] S. Takada, J.-W. Liang, T. Li, Shell-Mode Response of Buried Pipelines to Large Fault Movements, *Journal of Structural Engineering(JSCE)*, 44A (1998) 1637-1646.
- [5] S. Takada, N. Hassani, K. Fukuda, A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1257 (2001) 1243-1257.
- [6] D.K. Karamitros, D.B. George, G.P. Kouretzis, Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings, in, 2007, pp. 200-211.
- [7] O.V. Trifonov, V.P. Cherniy, A semi-analytical approach to a nonlinear stress – strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (2010) 1298-1308.
- [8] P. Vazouras, S.A. Karamanos, P. Dakoulas, Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (2010) 1361-1376.
- [9] P. Vazouras, S.A. Karamanos, P. Dakoulas, Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41 (2012) 164-180.
- [10] S. Joshi, A. Prashant, A. Deb, S.K. Jain, Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (2011) 930-940.
- [11] J. Zhang, Z. Liang, C.J. Han, Buckling behavior analysis of buried gas pipeline under strike-slip fault

- forty-fifth edition, 2013.
- [27] DAS, Principles of Geotechnical Engineering, Journal of Chemical Information and Modeling, 53 (2013) 1689-1699.
- [28] D. Karamitros, Design of Buried Pipelines against Permanent Ground Displacements, in, 2016.
- [29] M.J. O'Rourke, J.X. Liu, Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines, 2006.
- [30] D.C. Drucker, W. Prager, Soil mechanics and plastic analysis or limit design, 1952.
- [31] L.E. Schwer, Y.D. Murray, A three-invariant smooth cap model with mixed hardening, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 18 (1994) 657-688.
- [21] American Lifelines Alliance (ALA)- Seismic Guidelines for Water Pipelines, Federal Emergency Management Agency (FEMA) and the National Institute of Building Sciences (NIBS), 2005.
- [22] ASME B31.8-Gas transmission and distribution piping systems, American Society of Mechanical Engineers, 2003.
- [23] ASME B31.4-Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries, 2012.
- [24] IITK-GSDMA guidelines for seismic design of buried pipelines, Indian Institute of Technology Kanpur, national information center of earthquake engineering, 2007.
- [25] ASCE - Guideline for seismic design for oil and gas pipeline System, 1984.
- [26] API 5L Specification for Line Pipe, api specification 5L

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. R. Radaei, M. H. Erami, Determining the appropriate dimensional and behavioral model for numerical modeling of the buried pipelines crossing strike-slip faults, Amirkabir J. Civil Eng., 54(4) (2022) 1461-1482.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.19590.7207

