

تأثیر تغییرات طولی ساختار خاک در رفتار لرزه ای لوله های مدفون

فرناز فدائی^۱، نعمت حسنی^۲، حمید صفاری^{۳*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- زلزله، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- استادیار، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳- ۳۰۲

چکیده

هدف از این مقاله بررسی رفتار خطوط لوله پیوسته گذر کننده از دو خاک با جنس و سختی متفاوت تحت اثر تغییر مکان های زمانی یک زلزله یکسان می باشد. شاخص های تنش و جابجایی به ازای زاویه های مختلف بین خط لوله و مرز بین دو لایه ی خاک بررسی شده است. بدین منظور از نرم افزار آباکوس استفاده گردید و لوله با المان پوسته ای و خاک اطراف آن به صورت توده پیوسته مدل سازی شد. مقدار تنش و جابجایی در طول تقاطع و به ازای زاویه های تقاطع مختلف خاک و لوله و نسبت مدول یانگ متفاوت خاک ها به دست آورده شد. نتایج نشان می دهند که بیش ترین تنش در طول لوله در گره به فاصله مشخصی قبل از مرز و در خاک سخت تر ایجاد می شود. هم چنین با افزایش زاویه تقاطع لوله با مرز بین دو لایه، مقدار جابجایی بیشتر شده و مقدار تنش تا زاویه ۳۰ درجه افزایش و سپس کاهش می یابد. کاهش نسبت مدول یانگ نیز باعث افزایش تنش در قبل و بعد از محل تقاطع می گردد. با تغییر ضخامت لوله، جابجایی و تنش در لوله و خاک لایه ای اطراف آن دستخوش تغییرات قابل ملاحظه ای می گردد به طوری که با کاهش ضخامت لوله از ۲۰ به ۱۵ میلی متر (کاهش ۳۳٪) تنش حدوداً ۱۵ درصد افزایش می یابد. شرایط خاک نرم (خاک دو لایه با جنس خاک نرم) در هر شرایطی منجر به افزایش ظرفیت تغییر شکل و پاسخ لوله می گردد.

کلمات کلیدی: لوله مدفون، زلزله، رکورد تاریخچه زمانی تغییر مکان، تقاطع لوله، تحلیل اجزای محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.108454.1391	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.108454.1391	۱۳۹۸/۱۰/۱	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۱/۱۲	۱۳۹۶/۹/۰۴
حمید صفاری					*نویسنده مسئول:	
h_saffari@sbu.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Soil longitudinal variation effects on seismic behavior of buried pipelines

Farnaz Fadaei¹ Nemat Hassani² Hamid Saffari³

1-MSc, Department of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2 assistant professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3 Assistant Professor, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the behavior of continuous pipeline passing through two different layers of soil with different levels of resistance under displacement time-histories of the same earthquake. The values of stress and displacement are studied for different angles between pipe and interface of soil layers. To this end, pipe and the surrounding soil are modeled using shell and solid elements, respectively, in ABAQUS Software. Stress and displacement values are calculated along the intersection and for different values of intersection angle between soil layer and pipeline and different values of Young's modulus of the soils. These evaluations indicate that, the maximum stress along the pipeline occurs at the node in certain distance before the interface in the harder soil. Moreover, with increasing the angle, the resulting displacement increases, and the value of stress increases with angles up to 30°, beyond which angle it decreases. Also, a decrease in the ratio of Young's modulus increases the stress both before and after the interface. Significant changes are observed in displacement and stress along the pipeline with changing the pipe thickness, so that a decrease in the pipe thickness in the studied model from 20 to 15 mm (33% reduction) results in some 15% increase in the stress. Soft soil (two-layered soft soil) increases pipe displacement and response capacity in every condition.

ARTICLE INFO

Receive Date: 25 November 2017

Revise Date: 01 April 2018

Accept Date: 10 May 2018

Keywords:

Buried pipeline, Earthquake, Displacement time-history record, Pipeline intersection, Finite element method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

10.22065/jsce.2018.108454.1391

*Corresponding author: Hamid Saffari

Email address: h_saffari@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

معرفی سیستم‌های خط لوله به عنوان شریان‌های حیاتی بیان‌گر اهمیت عملکرد آن‌ها در حفظ ایمنی و سلامت عموم است و در کاهش و یا افزایش خسارات و آسیب‌پذیری ناشی از خطرات زمین‌لرزه نقش کلیدی دارند؛ لذا تقویت بخش صنعتی کلان‌شهرها و ارائه‌ی خدمات، نیازمند توجه ویژه به عملکرد لوله‌های مدفون است.

شرایط محلی مانند جنس خاک و نحوه‌ی لایه بندی خاک از عوامل مؤثر بر رفتار لرزه‌ای می‌باشد که باید مورد بررسی قرار گیرد؛ بنابراین به نظر می‌رسد بررسی رفتار لرزه‌ای لوله بدون لحاظ نمودن اثر خاک منجر به نتایج واقعی نخواهد شد. مشاهدات به‌طور واضح نشان می‌دهد که کرنش نسبتاً بالا در خطوط لوله در زمین غیر یکنواخت رخ داده است؛ بنابراین توپوگرافی‌های ناهمگون خاک در زمین در پاسخ لرزه‌ای زمین مؤثرند. تأثیر لایه‌های خاک در ایجاد تفاوت‌های فراوان بین امواج گسیل‌شده از چشمه و امواج رسیده به سطح زمین به اثبات رسیده است اما مشکل موجود، عدم حصول به نتایج قابل قبول و عملی برای تعیین رفتار لرزه‌ای عوارض گوناگون توپوگرافی و نیز کاربردی شدن این نتایج است. از دیگر پارامترهای مؤثر در رفتار لرزه‌ای لوله‌ها ویژگی‌های زلزله از جمله شدت زمین لرزه، تاریخچه زمانی شتاب افقی و عمودی امواج، دوام، PGV، PGA و دامنه و ویژگی‌های سازه از جمله ابعاد لوله مانند قطر و ضخامت، مقاومت مصالح و نوع اتصالات می‌باشد [1].

سرآغاز مطالعات تحلیلی در مورد لوله‌های مدفون در سال ۱۹۷۵ توسط نیومارک و هال می‌باشد که تلاش کردند پاسخ مکانیکی لوله را با استفاده از یک مدل ساده به‌صورت یک خط مستقیم بین دو نقطه‌ی مهارتی که با اصطکاک لغزشی خاک رابطه مستقیم داشت بیان کنند [2]. کندی و همکاران در سال ۱۹۷۷ روش نیومارک و هال را ارتقا داده، به این ترتیب که نیروهای جانبی اعمالی از ناحیه خاک به خط لوله در نظر گرفته شد. در این روش تغییر شکل‌های به وجود آمده در خط لوله منحصر به تغییر طول محوری گردیده است و از سختی خمشی لوله صرف نظر شده است [3]. وانگ و یاه در سال ۱۹۸۵ با تصحیح مدل کندی تأثیر سختی خمشی را نیز بر پاسخ خط اضافه نمودند [4]. در سال ۱۹۹۴ چپو و همکارانش مدل وانگ و یاه را بهبود بخشیدند. ایشان به‌منظور رفع نقیصه‌ی مدل وانگ با استخراج معادلات دیفرانسیل توابع جابه‌جایی مقاطع لوله، انحنای خط لوله را متغیر فرض نمودند [5]. تاکاهاشی و همکاران یک روش ساده‌ی تحلیلی برای خط لوله‌ی مستقیم که توسط محیط بی‌نهایت الاستیک (خاک) احاطه می‌شود، بسط دادند نتایج تحلیلی حاصل از کار آن‌ها که لغزش در فصل مشترک خاک-لوله را در نظر نمی‌گیرد، دلالت بر آن دارد که کرنش لوله تقریباً برابر کرنش میدان آزاد است و بنابراین تأثیر نیروی اینرسی قابل صرف نظر کردن است [6]. شینوزوکا و همکاران معادله‌ی ارائه شده توسط تاکاهاشی را اصلاح کردند و یک فاکتور تبدیلی (β) را بین کرنش زمین و کرنش لوله، برای حالتی که هیچ لغزشی بین لوله و خاک در فصل مشترک اتفاق نمی‌افتد (یعنی فنرهای خاکی الاستیک باقی می‌مانند) ارائه دادند [7]. در سال ۱۹۸۸ اوروک و حامادی از روش دیگری برای تخمین ماکزیمم کرنش محوری ایجاد شده در لوله پیوسته به علت انتشار امواج استفاده کردند، آن‌ها مقاومت خاک در جهت حرکت محوری لوله به‌وسیله‌ی یک فنر خطی با سختی K_g مدل نمودند و از آنجا که کرنش لغزشی کم‌تر از کرنشی است که باعث خرابی لوله می‌شود، انتشار خرابی در لوله‌های پیوسته، نوعاً شامل مقداری لغزش در فصل مشترک خاک-لوله می‌شود [8].

مطالعات عددی در این باره اولین بار توسط وانگ و چنگ در سال ۱۹۷۹ با آنالیز تغییر شکل لرزه‌ای با روش شبه استاتیکی برای لوله‌های مدفون در معرض بار زلزله انجام گرفت. آن‌ها دریافتند که رفتار لوله‌های مدفون تحت تأثیر تأخیر زمانی امواج لرزه‌ای و مقاومت غیریکنواخت خاک است [9]. اوروک و لئو سال ۱۹۹۹ کرنش و انحنای زمین در اثر انتشار امواج را آنالیز نموده و به بررسی اثر شرایط زیر سطحی متفاوت بر کرنش زمین پرداختند. کرنش زودگذر زمین به‌عنوان پاسخ غالب سازه‌های طویل زیرزمینی همچون خطوط لوله و تونل تحت انتشار امواج لرزه‌ای شناخته شدند [10]. تاکادا و تنابه در سال ۱۹۸۷ به تحلیل عددی شبه استاتیکی سه بعدی برای خطوط لوله مدفون پیوسته و منفصل که در معرض حرکات دائمی زمین و یا انتشار امواج لرزه‌ای هستند پرداختند [11]. ژی در سال ۲۰۰۸ برای مدل کردن لوله از المان‌های تیر استفاده نمود و اثر اندرکنش خاک را نیز با استفاده از فنرهای غیرخطی به روش وینکلر لحاظ نمود. هم‌چنین برای بررسی دقیق‌تر این پدیده در نرم‌افزار ABAQUS برای مدل کردن رفتار لوله از المان‌های پوسته‌ای به‌صورت سه بعدی استفاده نمود [12]. رحیم زاده در سال ۱۳۸۷ به بررسی عملکرد لرزه‌ای خطوط لوله مدفون تحت اثر پدیده انتشار امواج بدنه‌ای زلزله پرداخت. وی رفتار لرزه‌ای بخشی از یک لوله مدفون با استفاده از تئوری تیر بر روی بستر ارتجاعی به‌صورت سه‌بعدی و با در نظر گرفتن لغزش احتمالی بین

خاک و لوله را مدل نمود. در این روش اندرکنش بین خاک و لوله با فنرهای با رفتار الاستوپلاستیک در سه جهت در نظر گرفت [۱۳]. در سال ۱۳۸۹، صابری و همکاران خطوط لوله فولادی پیوسته مدفون در خاک تحت اثر انتشار موج را مورد مطالعه قرار دادند. وی برای مدل-سازی و بررسی خطوط، از ترکیب المان‌های پوسته و تیر و شرایط مرزی معادل برای تیر استفاده نمود؛ همچنین برای مدل کردن رفتار واقعی تر اندرکنش لوله-خاک در لغزش و جابه‌جایی نسبی، خاک اطراف المان پوسته را به صورت یک توده پیوسته با مدل رفتاری الاستوپلاستیک و خاک اطراف المان‌های تیر، با استفاده از فنرهای خاکی دو خطی در سه جهت عمود بر یکدیگر، مدل‌سازی نمود [۱۴]. هدف از این مقاله مطالعه و بررسی رفتار لرزه‌ای لوله مدفون در دو لایه خاک با محوریت اندرکنش خاک و لوله و با اعمال تاریخچه زمانی جابه‌جایی زلزله طیس از قسمت تحتانی مدل می‌باشد. روش مطالعه در این مقاله انجام مدل‌سازی به روش المان محدود توسط نرم افزار ABAQUS می‌باشد.

۲- مدل‌سازی و روند تحلیل

در این مقاله به مدل‌سازی سه بعدی لوله در خاک دو لایه با زوایای متفاوت در مرز دو خاک با استفاده از نرم افزار ABAQUS پرداخته می‌شود. در این مدل‌سازی محیط خاک پیرامون و لوله در محیط نرم افزار بر اساس هندسه و خواص مصالح به صورت سه بعدی و به صورت دو بخش جدا از هم تعریف و مش بندی شده است؛ بدین صورت که بخشی از لوله به طول ۸۰ متر و قطر ۱ متر با المان shell از جنس فولاد و خاک با ارتفاع ۳۰ متر به صورت توده پیوسته با المان‌های solid با مدل رفتاری دراکر پراگر فرض شده است. اندرکنش میان خاک و لوله و نیز دو خاک نیز در نرم افزار تعریف و با توجه به تغییر شکل‌های زیاد ایجاد شده در مدل و تأثیر زیاد غیر خطی هندسی در نتایج از آنالیز Dynamic Explicit استفاده شده است.

صحت سنجی رفتار و عملکرد خطوط لوله مدفون در مدلسازی با اجزای محدود یا سایر روشهای عددی با داده های تجربی و واقعی می‌تواند با مقایسه نتایج این روشها با آسیب های ناشی شده طی زلزله های شدید انجام گیرد. تحقیقات انجام شده توسط لئون و وانگ [۱۵] بر اساس مطالعه میدانی زیاد نشانگر آن است که حرکت خطوط لوله مدفون به طور مستقیم به حرکت زمین در دو جهت طولی و عرضی وابسته است. آنها گزارش دادند که بسیار نادر بوده است که نیروی اینرسی سازه لوله بر پاسخ آن تأثیر قابل توجهی بگذارد. نتیجه گیری می‌شود که بطور عمده ویژگی های جابجایی زمین ناشی از زلزله هستند که بر خط لوله مدفون تأثیر می‌گذارند. از این رو سازه لوله مدفون از تغییر مکان نسبی بین لوله و زمین اطراف آن تأثیر پذیر است. در این تحقیق سعی شده است با مدلسازی دقیق خط لوله و خاک اطراف آن در نرم افزار ABAQUS و وارد نمودن کلیه شرایط مدلسازی بطور مناسب اعم از مدول الاستیسیته، چگالی، نسبت پواسن، ضریب اصطکاک طولی و جانبی، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، زاویه اتساع (ψ)، نرخ تنش جاری شدن و در نظر گرفتن مدل رفتاری نزدیک به واقعیت (دراکر پراگر سخت شونده) مدلسازی ها و نتایج مربوطه از دقت بالا برخوردار گردند. فرضیات انجام شده در تحلیل به قرار زیر است:

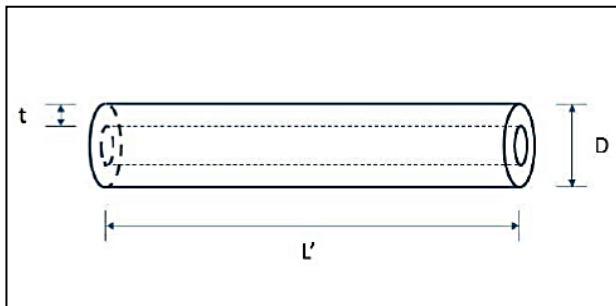
- ۱- لوله مستقیم و بدون هیچ‌گونه خمیدگی است.
 - ۲- فشار داخلی لوله و اثرات آب زیر زمینی در نظر گرفته نشده است.
 - ۳- وزن لوله و خاک با وارد کردن جرم مخصوص آن ها به صورت خودکار محاسبه و اعمال شده است.
 - ۴- بار جانبی به صورت بار زلزله طیس بر قسمت تحتانی و به مدت ۵ ثانیه به مدل وارد می‌شود.
- اثر زاویه برخورد لوله با دو خاک و نیز جنس خاکها بر رفتار لوله با رسم نمودارهای بیشترین مقادیر جابه‌جایی و تنش در بدنه‌ی لوله مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳- مشخصات سازه‌ای خط لوله

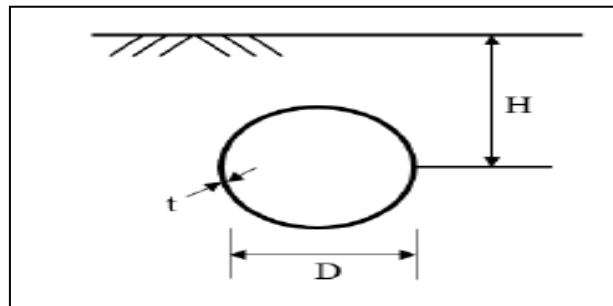
مدل استفاده شده برای شبیه سازی لوله، قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرخطی را دارا می‌باشد؛ بنابراین مشخصات در دو بخش ارتجاعی و غیر ارتجاعی با توجه به جدول (۱) معرفی می‌گردد.

جدول ۱: مشخصات لوله فولادی API 5L X60

نوع مصالح	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_{ix} (MPa)	ν	ρ (kg/m^3)	عمق دفن (m)	طول (m)	ضخامت (mm)	قطر (mm)
X60	207	614	530	0,3	7850	1,5	10	15	1000



شکل ۲: مقطع طولی لوله



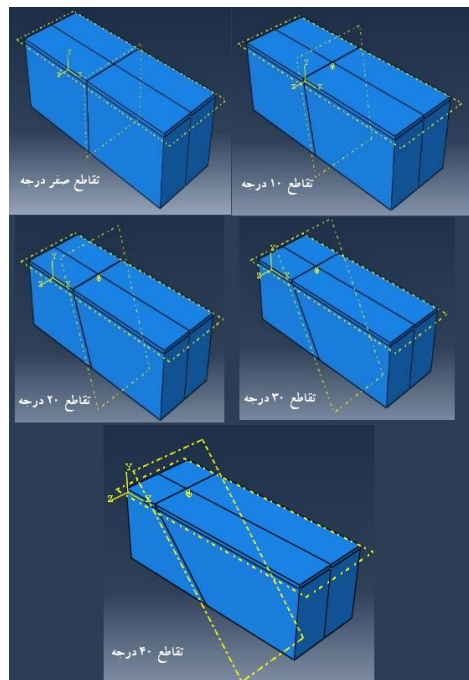
شکل ۱: مقطع عرضی لوله

۴- مشخصات خاک پیرامون لوله

ابعاد کل خاک شامل دو لایه با توجه به طول لوله‌ی مورد مطالعه به صورت $30 \times 30 \times 80$ متر (با فرض این که سنگ بستر در ارتفاع ۳۰ متر واقع است) مدل شده است که با توجه به زاویه مابین دو خاک مانند جدول (۲) تقسیم بندی می‌شود. شکل (۳) زوایای مختلف تقاطع لوله با دو خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات ابعاد کلی خاک

ارتفاع (m)	عرض (m)	طول (m)	عمق دفن (m)
30	30	10	1,5
مدل 40°	مدل 30°	مدل 20°	مدل 10°
خاک سخت	خاک سخت	خاک سخت	خاک سخت
$30 \times 30 \times 64,3$	$30 \times 30 \times 56,74$	$30 \times 30 \times 50,56$	$30 \times 30 \times 45,09$
خاک نرم	خاک نرم	خاک نرم	خاک نرم
$30 \times 30 \times 15,7$	$30 \times 30 \times 23,26$	$30 \times 30 \times 29,44$	$30 \times 30 \times 34,91$



شکل ۳: مقطع خاک با زوایای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه نسبت به محور قائم همراه پارتیشن بندی در محیط نرم افزار

رفتار تنش و کرنش خاک برای همه‌ی گام‌های زمانی بار وارده الاستیک خطی نبوده و رفتارهای متنوعی را از خود در معرض رفتارهای مکانیکی گوناگون خاک نشان می‌دهد. بسیاری از روش‌ها و نظریه‌ها به منظور ارائه یک پیش‌بینی بهتر از رفتار پیچیده خاک توسعه یافته‌اند. با این حال، اگرچه نتایج به دست آمده توسط سایر معیارها در برآورد رفتار واقعی خاک دقیق‌تر هستند، نظریه کولمب یک روش ساده‌تر از بقیه برای برخورد با رفتار مکانیکی خاک است [۱۶]. مدل رفتاری دراکر پراگر نیز مدل تقریبی از مدل موهر-کولمب است و رفتاری کشسان خمیری دارد، بدین معنا که ضمن بارگذاری و باربرداری‌های پی در پی حد تسلیم آن‌ها افزایش یا کاهش می‌یابد [۱۷]؛ بنابراین شبیه سازی بخش غیرخطی رفتار خاک با استفاده از مدل خمیری دراکر- پراگر سخت شونده، انجام شده است و از طریق مشخصه‌های دینامیکی خاک هم‌چون زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع خاک در تعریف رفتار غیرخطی رفتار مدل به رفتار واقعی نزدیک می‌گردد. اطلاعات ژئوتکنیکی توده‌ی خاک مدل‌سازی شده به قرار زیر است:

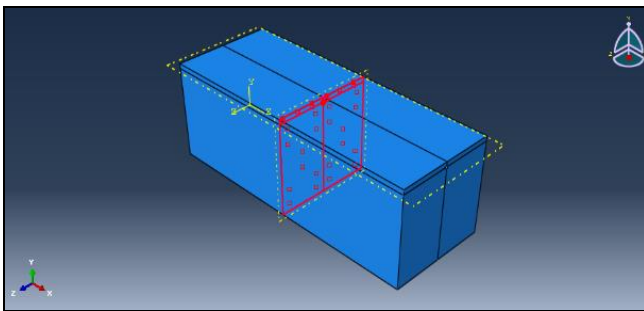
جدول ۳: مشخصات خاک‌ها

نوع خاک		مشخصه
Hardclay ۱	Clay ۲	
۱۴	۴	مدول الاستیسیته (MPa)
۲۰۰۰	۱۸۰۰	چگالی (kg/m^3)
۰٫۳	۰٫۳	نسبت پواسن ν
۰٫۶	۰٫۶	ضریب اصطکاک طولی و جانبی
۲۵	۰	زاویه اصطکاک داخلی ϕ
۴۴٫۵۳	۰	زاویه اتساع Ψ
۰٫۸۵	۱	نرخ تنش جاری شدن
تنش تسلیم	کرنش پلاستیک مطلق	مدل رفتاری دراکر پراگر سخت شونده
۷۵۰۰۰	۰	
۱۰۰۰۰۰	۰٫۰۰۵	
۱۵۰۰۰۰	۰٫۰۱	

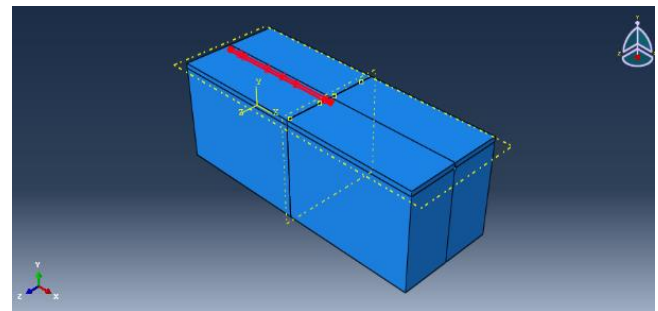
۵- اندرکنش خاک و لوله

به طور کلی هر سازه‌ی مدفون در خاک، در هنگام زلزله تحت تأثیر شش مؤلفه حرکت زمین قرار می‌گیرد. این مؤلفه‌ها شامل دو مؤلفه جانبی، یک مؤلفه قائم و سه مؤلفه پیچشی حول محورهای مختصات می‌باشد. بر همین اساس سازه و خاک اطراف آن دارای اثر متقابل بر روی هم بوده و این عامل باعث تغییرات بیش‌تر در اثر امواج لرزه‌ای می‌شود. مفهوم این امر این است که نمی‌بایستی در تحلیل‌های لرزه‌ای فقط به تحلیل سازه پرداخت و اثر اندرکنش سازه و خاک باید مورد توجه قرار گیرد [۱۷].

در این تحقیق دو نوع تماس بین سطوح مشترک در نظر گرفته شده است: تماس اصطکاکی و تماس عمودی. در تماس اصطکاکی (مماسی) از فرمولاسیون پنالتی (Penalty Method) با ضریب اصطکاک ثابت ۰٫۵ و ۰٫۶ به ترتیب برای اندرکنش خاک با سازه‌های فلزی (شکل ۴) و خاک با خاک (شکل ۵) استفاده شده است. در تماس عمودی بین دو سطح از فرمولاسیون پنالتی (Penalty Method) و تماس سخت (Hard contact) با امکان ایجاد جدایی بین دو سطح استفاده شده است تا از فروریزش سطوح از یکدیگر جلوگیری شود. تماس از نوع سخت امکان نفوذ سطح فرعی به داخل سطح اصلی را به حداقل می‌رساند و اجازه انتقال تنش کششی در سطح تماس را نمی‌دهد. در این نوع تماس وقتی سطوح در تماس با هم قرار می‌گیرند هر تماس فشاری بین آن‌ها منتقل می‌شود. اگر این فشار تماسی به صفر برسد سطوح از یکدیگر جدا می‌شوند. سطوح جدا شده بار دیگر در تماس با هم قرار می‌گیرند [۱۸].



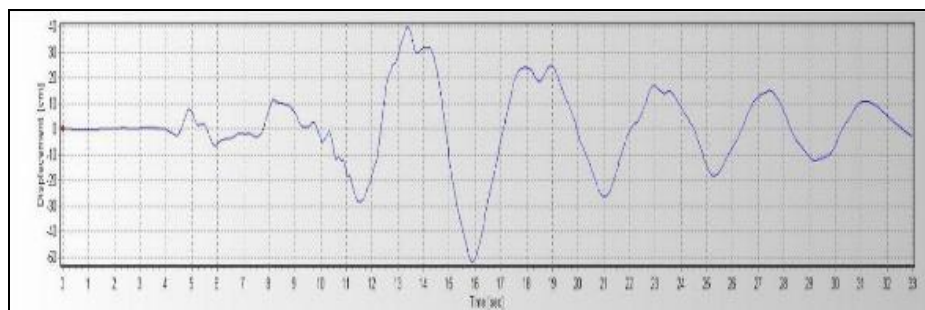
شکل ۵: اندرکنش بین دو خاک



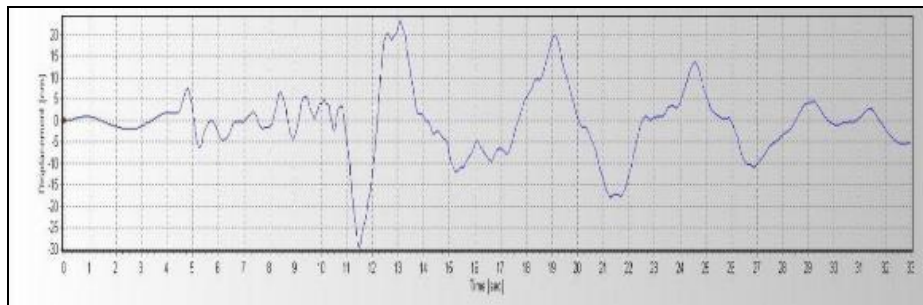
شکل ۴: اندرکنش بین خاک ۲ و لوله

۶- بار زلزله

برای وارد کردن جابه‌جایی، رکورد شتاب‌نگاشت زلزله طیس با بزرگای ۷٫۴ را ابتدا با استفاده از نرم افزار Seismosignal تصحیح محور پایه و نوفه گردید و نمودار جابه‌جایی-زمان مربوطه استخراج شد. این رکورد تاریخچه زمانی به مرز پایین خاک که سنگ بستر لرزه‌ای فرض شده است اعمال گردید. در ادامه مدل اجزاء محدود تحت دو مؤلفه افقی عرضی و طولی رکورد زلزله طیس قرار گرفت و با توجه به زمان‌بر بودن تحلیل و حجیم بودن مدل‌ها، برای انجام محاسبات از ناحیه نوسانات شدید رکورد زلزله (ثانیه ۱۶ تا ۲۱) استفاده گردید. در شکل (۶) و (۷) تاریخچه زمانی تغییر مکان مؤلفه‌های افقی زلزله طیس ارائه شده است.



شکل ۶: مؤلفه افقی عرضی تاریخچه زمانی جابه‌جایی زلزله طیس



شکل ۷: مؤلفه افقی طولی تاریخچه زمانی جابه‌جایی زلزله طیس

فرض بر این است که از گره‌های مرزی به بعد تغییراتی در اثر بارهای اعمال شده در محیط صورت نخواهد گرفت. باید افزود بدلیل انتخاب طول مناسب برای لوله مرزهای صلب تاثیر چندانی بر پاسخ سیستم ندارند.



۷- مش بندی

جهت انجام تحلیل‌های موردنیاز این تحقیق برای مدل سازی لوله از المان‌های پوسته‌ای چهار گرهی با انحنای دو طرفه با روش انتگرال گیری کاهش یافته (S4R) از نوع همگن استفاده شده است و برای مدل سازی خاک از المان‌های مکعب مستطیلی شش وجهی هشت گرهی (که دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر گره می‌باشند) با روش انتگرال گیری کاهش یافته (آجری) (C3D8R) استفاده شده است. این المان‌ها به گونه‌ای است که می‌توانند رفتارهای پیچیده غیر خطی مانند اعوجاج ایجاد شده در لوله را مدل سازی کنند. با توجه به آنالیز حساسیت مطابق شکل ۸ لوله و خاک به صورت مش بندی‌های ۱ متری در طول لوله و مطابق جدول ۴ انجام گرفته است. مشخصات المانهای مورد استفاده در جدول (۵) و (۶) ارائه شده است. همچنین مش بندی مدل در شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است.

جدول ۴: آنالیز حساسیت

θ	ماکزیمم تنش (مگا پاسکال)		درصد افزایش
	بعد مش خاک برابر ۲ متر	بعد مش خاک برابر ۱ متر	
۰	۲۶۵	۲۷۵	٪۳/۷۷
۱۰	۲۹۵	۳۰۹	٪۴/۷۴
۲۰	۳۹۰	۴۰۹	٪۴/۸۷
۳۰	۳۹۵	۴۱۴	٪۴/۸۱
۴۰	۳۶۶	۳۷۵	٪۴/۰۹

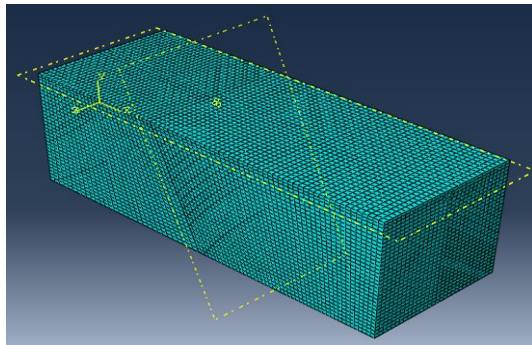
جدول ۵: المان حجمی لوله و خاک [15]

Material	Element type	First-order (or linear) interpolation	
Soil	Reduced integration continuum element	C3D8R	
Pipeline	Reduced shell element	S4R	

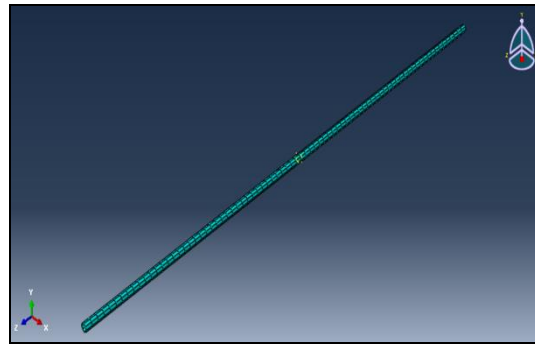
جدول ۶: تعداد المان و گره مدل

سایز مش بندی	تعداد کل المان های مش	خاک			لوله		تعداد المان مش	
		X	Y	Z	X	Z		
۱ متر	۷۲۶۴۰	۸۰	۳۰	۳۰	۷۲۰۰۰	۸	۸۰	۶۴۰

۶۴۰ المان چهارضلعی خطی S4R برای لوله و ۷۲۰۰۰ المان مکعبی C3D8R برای خاک



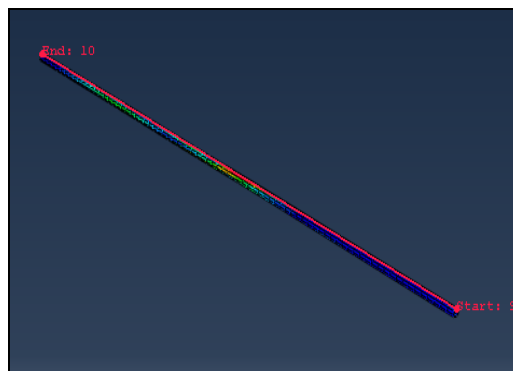
شکل ۹: مش بندی خاک با مرز ۲۰ درجه



شکل ۸: مش بندی لوله

۸- پارامترهای مورد بررسی

به منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد لوله، به تفکیک به بررسی مدل‌ها با تغییرات زاویه برخورد و مدول الاستیسیته خاک سخت به نرم (E_1/E_2) پرداخته شد. پارامترهایی مورد بررسی عبارتند از تنش و جابه‌جایی. تنش مورد بررسی، تنش فون مایسز که از جذر مجموع مربعات تنش‌های اصلی حاصل می‌شود می‌باشد. منظور از جابه‌جایی نیز برآیند تغییر مکان لوله است. لازم به ذکر است این پاسخ‌ها مربوط به زلزله طیس و در مسیر تعریف شده‌ی مطابق شکل (۱۰) در امتداد لوله می‌باشد.



شکل ۱۰: مسیر پاسخ تعریف شده در بالای لوله

نوع خاک اثر زیادی بر روی اندرکنش خاک و لوله دارد؛ به عبارتی دیگر خاک نرم در قبال خاک سخت اندرکنش بیشتری با لوله دارد و با نرم‌تر شدن خاک پیرامون لوله تغییر مکان و تنش موجود در بدنه لوله افزایش می‌یابد. بنابراین خاک پیرامون لوله در بحث تغییر شکل‌های جانبی و مسئله اندرکنش خاک و لوله دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد.

۹- نتایج تحلیل

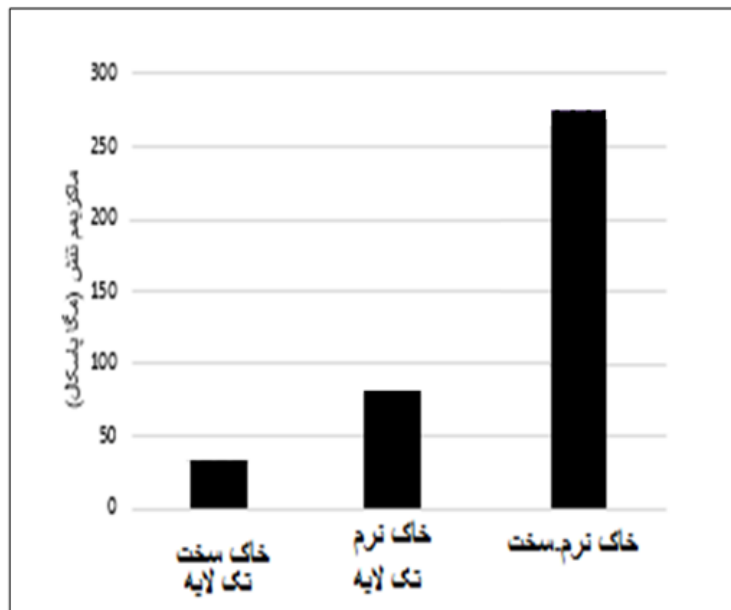
در این تحقیق سه تحلیل اجزای محدود به ازای حالات عبور لوله از لایه یا لایه‌های مختلف با شرایط زیر انجام شده است:

حالت ۱: لوله عبور کننده از فقط یک خاک سخت

حالت ۲: لوله عبور کننده از فقط یک خاک نرم

حالت ۳: لوله عبور کننده از دو خاک، یکی نرم و دیگری سخت (با تفاوت سختی زیاد)

تحلیل ها روی خاک های تک لایه مختلف نشان می دهد که ماکزیمم تنش در طول لوله در خاک یک لایه نرم نرم بیشتر از خاک یک لایه سخت می باشد و با دو لایه شدن آن تنش تغییر می یابد. وضعیت تنش در خاک یک و دو لایه تحت سختی های متفاوت در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱: ماکزیمم تنش در حالت تک و دو لایه‌ی خاک با مرز قائم

با بررسی تنش در طول مسیر در زوایای متفاوت خاک در مدل اصلی و یافتن ماکزیمم تنش در طول مسیر و مقایسه فاصله این نقطه با موقعیت مرز دو خاک از سر لوله (در قسمت خاک سخت) نتیجه می شود که ماکزیمم تنش در فاصله ۵ متری (با توجه به شرایط هندسه و بارگذاری مدل) قبل از مرز دو خاک و در خاک سخت ایجاد می شود (جدول ۷).

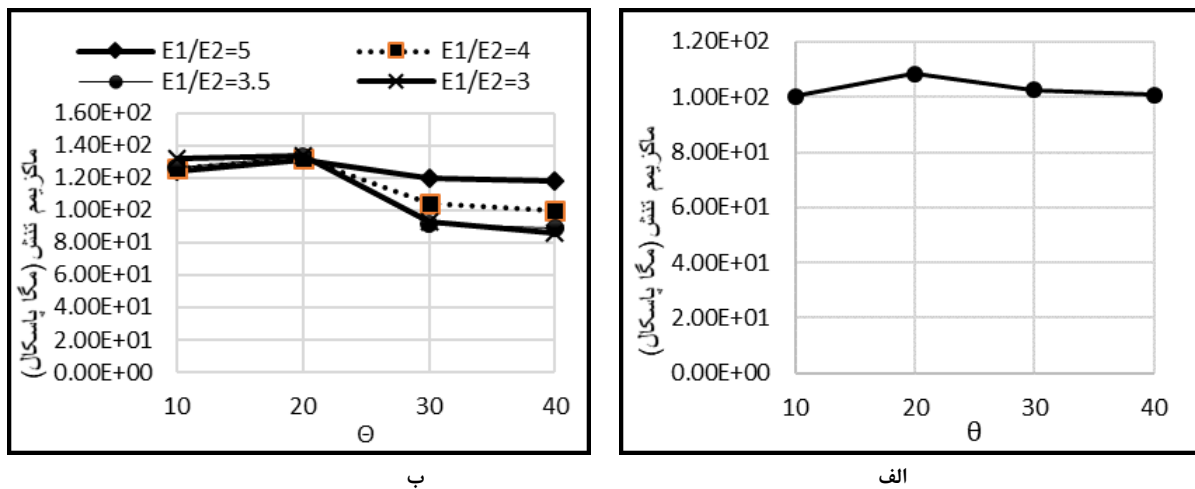
جدول ۷: محل مرز دو خاک و ماکزیمم تنش در زوایای متفاوت

اختلاف (متر)	فاصله ابتدای لوله تا گره ماکزیمم تنش (متر)	فاصله ابتدای لوله (در خاک سخت) تا مرز (متر)	زاویه مرز دو خاک
۵	۳۵	۴۰	۰
۵	۴۰٫۰۸	۴۵٫۰۹	۱۰
۵	۴۵٫۵	۵۰٫۵۶	۲۰
۵	۵۱٫۶۷	۵۶٫۷۴	۳۰
۵	۵۹٫۲۷	۶۴٫۸	۴۰

بررسی تنش در گره مرزی دو خاک

در مدل اصلی با تعریف دقیق روابط پلاستیک و الاستیک دو خاک و تغییر زاویه مرز، برای مقدار تنش در حالات مختلف مقادیر نظیر شکل (۱۲-الف) استخراج می شود. با تغییر نسبت مدول الاستیسیته خاک سخت به نرم و به دست آوردن تنش در هر نسبت در

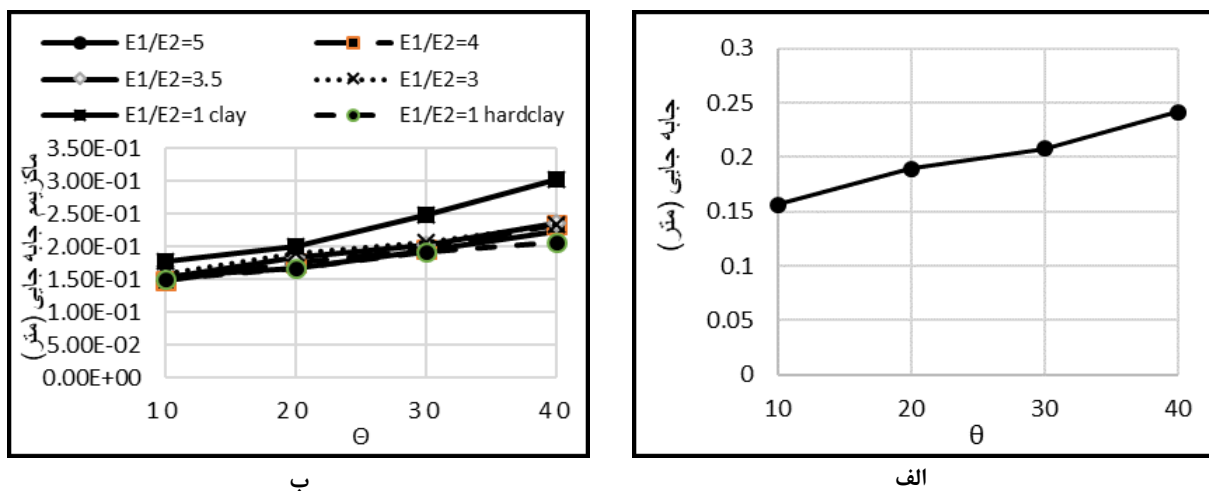
زوایای متفاوت مقادیر متناظر با شکل (۱۲-ب) نتیجه می شود. ماکزیمم تنش در مرز ۲۰ درجه ایجاد شده و بعد از آن کاهش می یابد که این مقدار کاهش در نسبت مدول یانگ های کمتر بیشتر است.



شکل ۱۲: مقدار ماکزیمم تنش در گره مرزی دو خاک در مدل های اصلی و با مدول یانگ های متفاوت

بررسی جابه جایی در گره مرزی دو خاک

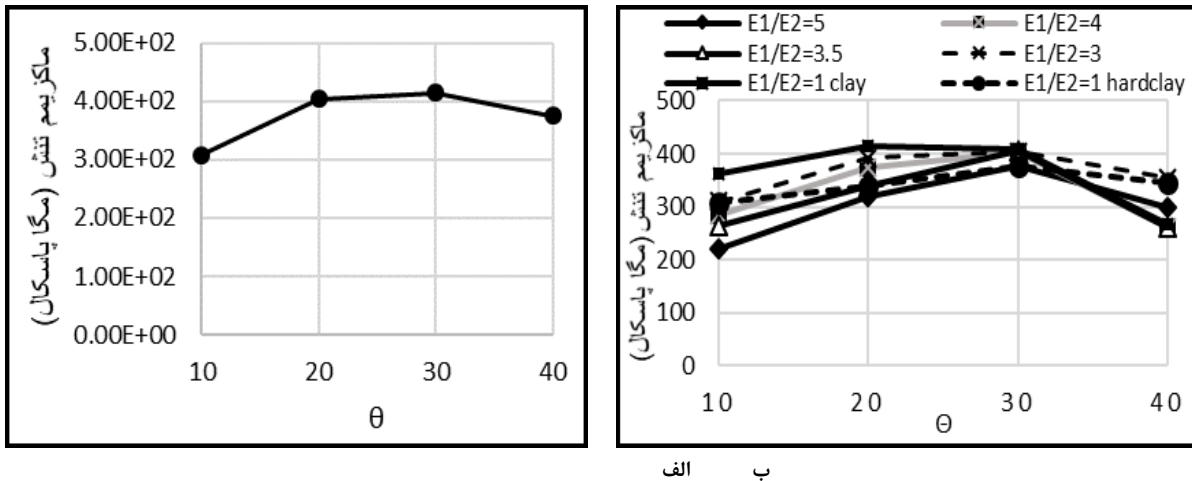
در شکل (۱۳) با افزایش زاویه مقدار جابه جایی افزایش می یابد و این مقدار زمانی که خاک دو لایه خاک نرم باشد بیشترین مقدار خود است و در سایر حالات تقریباً مقادیر جابه جایی یکسان است.



شکل ۱۳: مقدار جابه جایی در گره مرزی دو خاک در مدل های اصلی و با مدول یانگ های متفاوت

بررسی تنش در فاصله ۵ متر قبل مرز دو خاک

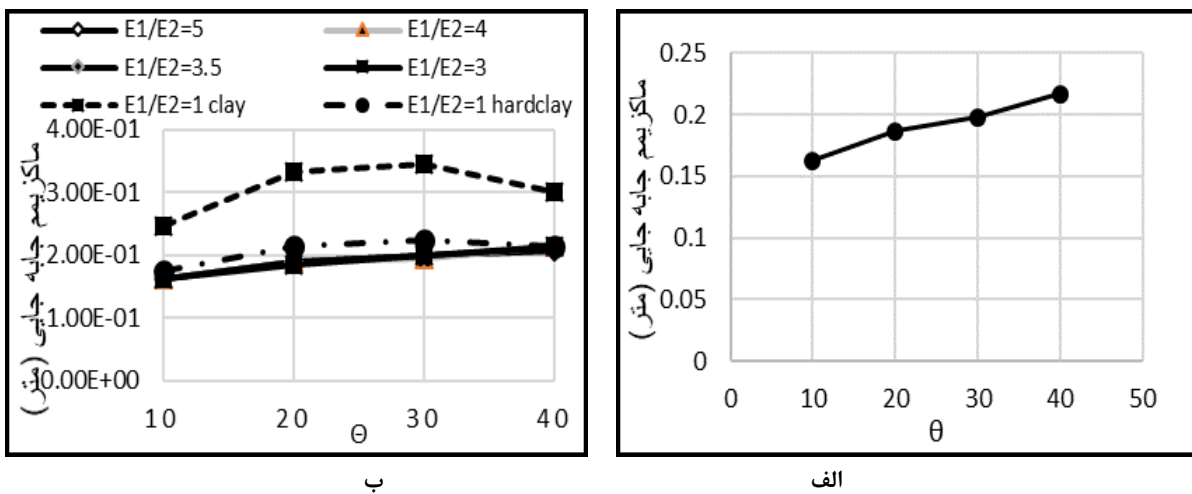
در این گره با توجه به شکل (۱۴) با کاهش نسبت مدول یانگ ماکزیمم تنش افزایش می یابد و در حوالی ۲۰ الی ۳۰ درجه (بسته به نسبت مدول یانگ) به ماکزیمم خود می رسد و این مقدار زمانی که خاک دو لایه خاک نرم باشد بیشترین مقدار خود است.



شکل ۱۴: مقدار ماکزیمم تنش در در فاصله ۵ متری قبل از مرز دو خاک در مدل‌های اصلی و با مدول یانگ‌های متفاوت

جابه‌جایی در فاصله ۵ متر قبل از مرز دو خاک

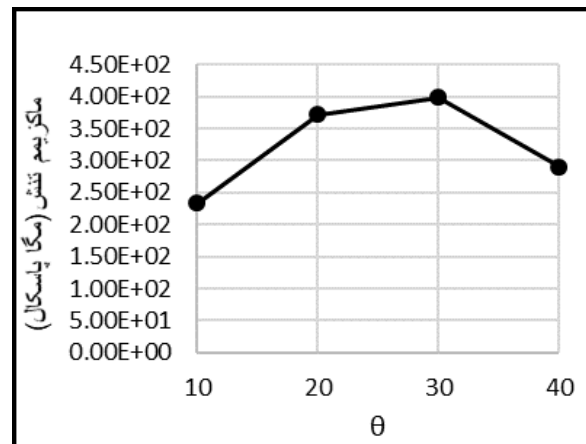
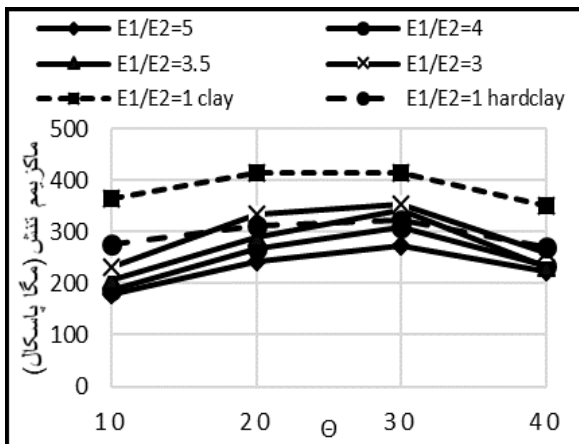
در شکل (۱۵) مقدار جابه‌جایی در نسبت‌های مختلف مدول الاستیسیته در حال افزایش و تقریباً به یک مقدار می‌باشد. البته در حالتی که خاک دو لایه نرم باشد میزان جابه‌جایی در زوایای ۲۰ الی ۳۰ درجه ماکزیمم خود را دارد و بیش‌ترین جابه‌جایی نیز در همین وضعیت می‌باشد.



شکل ۱۵: مقدار ماکزیمم جابه‌جایی در فاصله ۵ متری قبل از مرز دو خاک در مدل‌های اصلی و با مدول یانگ‌های متفاوت

تنش در فاصله ۵ متر بعد از مرز دو خاک

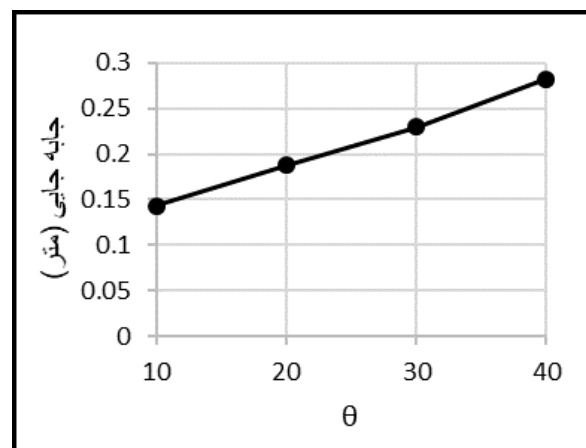
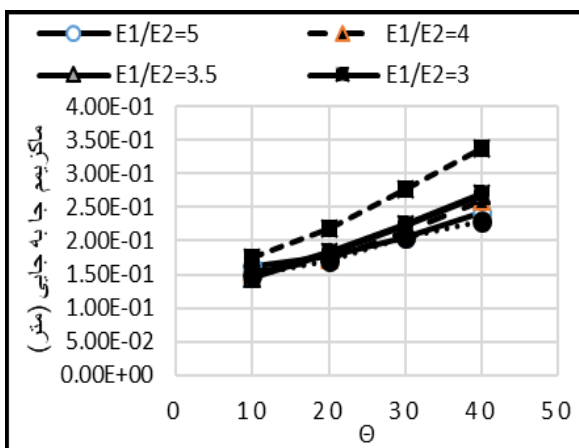
در شکل (۱۶) مانند بررسی گره قبل از مرز، با کاهش نسبت مدول یانگ ماکزیمم تنش افزایش می‌یابد و در حوالی ۲۰ الی ۳۰ درجه به ماکزیمم خود می‌رسد و این مقدار زمانی که خاک دو لایه خاک نرم باشد بیش‌ترین مقدار خود است.



شکل ۱۶: مقدار ماکزیم تنش در فاصله ۵ متر بعد از مرز دو خاک در مدل‌های اصلی و با مدول یانگ‌های متفاوت

جابه‌جایی در فاصله ۵ متر بعد از مرز دو خاک

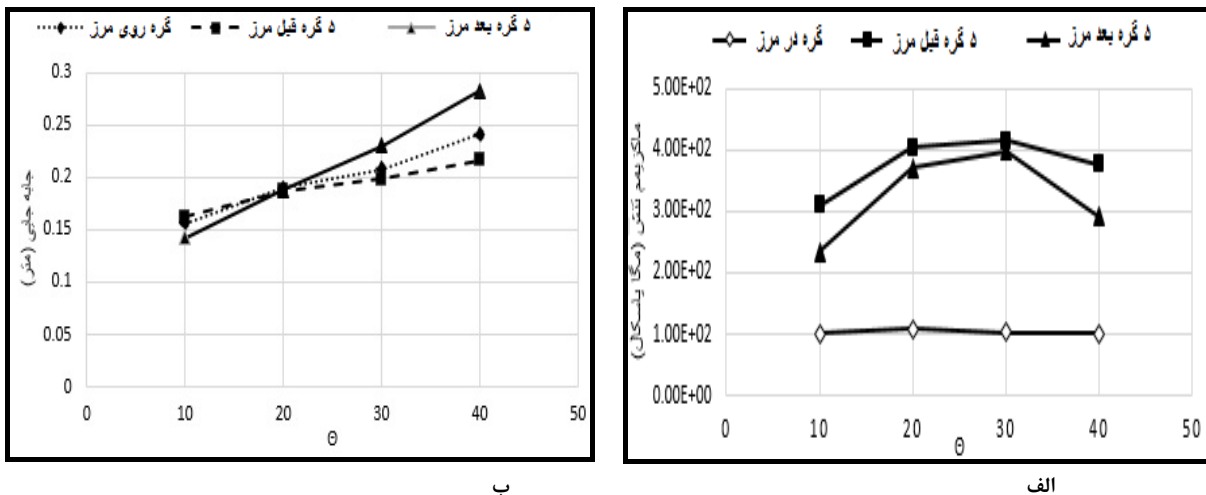
مقدار جابه‌جایی در مدل اصلی و نسبت‌های مختلف مدول یانگ در شکل (۱۷) در حال افزایش است که مقدار آن در حالتی که دو لایه خاک نرم باشد بیش‌ترین است.



شکل ۱۷: مقدار ماکزیم جابه‌جایی در فاصله ۵ متری بعد از مرز دو خاک در مدل‌های اصلی و با مدول یانگ‌های متفاوت

مقایسه مقدار تنش و جابه‌جایی در سه گره مورد مطالعه

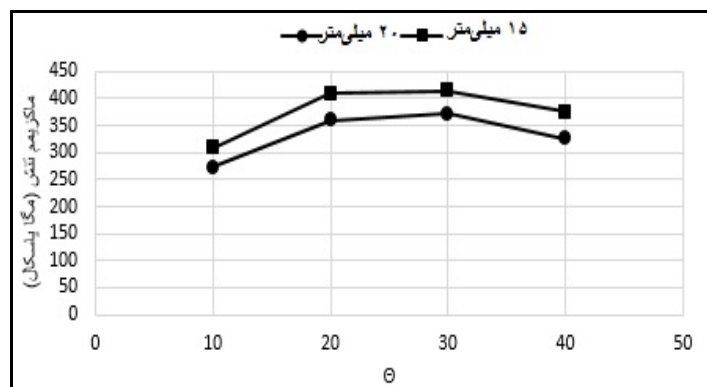
با مقایسه مقدار ماکزیم تنش در سه گره در حالت‌های روی مرز، قبل و بعد آن متوجه خواهیم شد که بیش‌ترین تنش در گره قبل مرز دو خاک (در خاک سخت‌تر) ایجاد می‌شود (شکل ۱۸ الف). مقدار جابه‌جایی در سه گره در حال افزایش بوده و در زوایای بالا جابه‌جایی در خاک نرم بیش‌تر از خاک سخت می‌باشد (شکل ۱۸ ب).



شکل ۱۸: مقایسه تنش و جابه‌جایی در سه گره قبل و بعد و روی مرز در مدل اصلی

تغییر ضخامت لوله

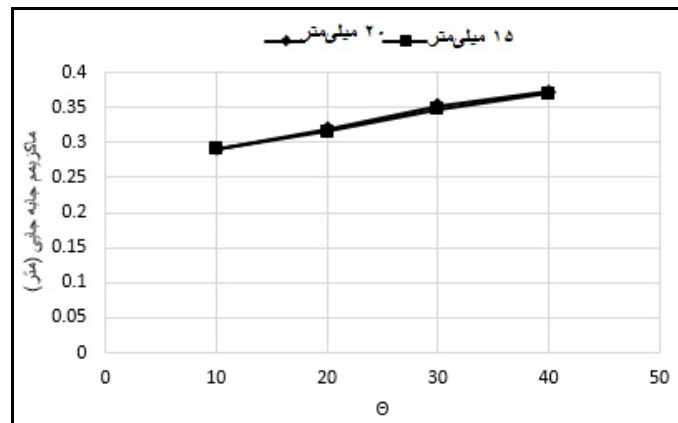
در مقایسه‌ی دیگر با افزایش ضخامت لوله از ۱۵ به ۲۰ میلی‌متر و با توجه به شکل (۱۹) نتیجه شد که با افزایش ضخامت میزان ماکزیمم تنش در لوله در حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد و مقدار جابه‌جایی تغییر چندانی نمی‌کند. بعبارت دیگر با تغییر ضخامت لوله اعم از کاهش یا افزایش، تنش در لوله و خاک لایه‌های اطراف آن بترتیب دستخوش افزایش یا کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌گردد.



شکل ۱۹: مقدار ماکزیمم تنش در زوایای متفاوت مرز خاک در دو ضخامت مختلف لوله

جدول ۸: مقدار افزایش تنش با کاهش ضخامت لوله از ۲۰ به ۱۵ میلی‌متر

θ	ماکزیمم تنش (مگا پاسکال)		درصد افزایش
	در لوله با قطر ۲۰ میلی‌متر	در لوله با قطر ۱۵ میلی‌متر	
۰	۲۲۲	۲۷۵	٪۱۸/۵۳
۱۰	۲۷۳	۳۰۹	٪۱۳/۱۸
۲۰	۳۶۰	۴۰۹	٪۱۳/۶۱
۳۰	۳۷۲	۴۱۴	٪۱۱/۲۹
۴۰	۳۲۶	۳۷۵	٪۱۵/۰۳



شکل ۲۰: مقدار ماکزیمم جابه‌جایی در زوایای متفاوت مرز خاک در دو ضخامت مختلف لوله

۱۰- نتیجه‌گیری

- بر اساس مدل‌سازی انجام شده و بررسی مقدار تنش مایسز و برآیند جابه‌جایی در مسیر لوله در ۵ ثانیه از رکورد جابه‌جایی زلزله (طبس) نتایج زیر قابل ارائه می‌باشند:
- ۱- تنش در خاک تک لایه‌ی نرم بیش‌تر از خاک تک لایه سخت می‌باشد و با دو لایه شدن خاک، ماکزیمم تنش به میزان قابل توجهی در لوله افزایش می‌یابد.
 - ۲- با بررسی تنش در طول لوله در زوایای متفاوت تقاطع لوله با مرز خاک، مشخص شد که تقریباً ماکزیمم تنش برای مدلسازی و بارگذاری لرزه ای انجام گرفته در فاصله ۵ متری قبل از مرز دو خاک و در خاک سخت ایجاد می‌شود.
 - ۳- شرایط خاک نرم (خاک دو لایه با جنس خاک نرم) در هر شرایطی منجر به افزایش ظرفیت تغییر شکل و پاسخ لوله می‌گردد.
 - ۴- در کلیه مدل‌های مورد مطالعه تنش در زاویه ۲۰ الی ۳۰ درجه در مرز خاک ماکزیمم خود را دارد و جابه‌جایی با افزایش زاویه افزایش می‌یابد.
 - ۵- مقدار ماکزیمم تنش در قبل و بعد مرز با کاهش نسبت مدول یانگ خاک سخت به نرم افزایش می‌یابد.
 - ۶- با تغییر ضخامت لوله اعم از کاهش یا افزایش، تنش در لوله و خاک لایه‌ای اطراف آن بترتیب دستخوش افزایش یا کاهش قابل ملاحظه ای می‌گردد. به عنوان نمونه با کاهش ضخامت لوله از ۲۰ به ۱۵ میلی‌متر (کاهش ۳۳٪) تنش حدوداً ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Vazinram, F. and Rasti, R., (2006). Seismic Hazards for Lifelines. In *Engineering Conferences International*, Tehran, Iran.
- [2] Newmark, N.M. and Hall, W.J., (1975). Pipeline design to resist large fault displacement, proceeding of the *U.S National Conference on Earthquake Engineering Ann Arbor*, Michigan EERI, pp. 416-25.
- [3] Safaei Nasab, H., (2012). Investigation of the behavior of the gas buried steel pipelines against the motion of the strike-slip fault by finite element method, *International Conference on Civil Engineering*, Tabriz, Iran.
- [4] Wang, L.R.L. and Yeh, Y.H., "A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 13(1), pp.75-96, (1985).

- [5] Chiou, Y.J., Chi, S.Y. and Chang, H.Y., "A study on buried pipeline response to fault movement", *Journal Of Pressure Vessel Technology*, 116(1), pp.36-41, (1994).
- [6] Sakurai, A. and Takahashi, T., "Dynamic stresses of underground pipelines during earthquakes", *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 81, (1969).
- [7] Shinozuka, M. and Koike, T., "Estimation of structural strains in underground lifeline pipes", *Columbia University, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics*, (1979).
- [8] O'Rourke, M.J. and Hmadi, K.E., "Analysis of continuous buried pipelines for seismic wave effects", *Earthquake engineering & structural dynamics*, 16(6), pp.917-929, (1988).
- [9] Jeon, S.S., "Seismic behavior of buried pipelines constructed by design criteria and construction specifications of both Korea and the US", *Natural Hazards and Earth System Science*, 13(9), pp.2271-2278, (2013).
- [10] O'Rourke, M.J. and Liu, X., "Response of buried pipelines subject to earthquake effects", (1999).
- [11] Takada, S. and Tanabe, K., "Three-dimensional seismic response analysis of buried continuous or jointed pipelines", *Journal of pressure vessel technology*, 109(1), pp.80-87, (1987).
- [12] Xie, X., "Numerical analysis and evaluation of buried pipeline response to earthquake-induced ground fault rupture", USA:UML,2,6:30, (2008).
- [13] Rahimzadeh, F. and Ghorbani, R., (2008). Investigating the seismic performance of buried pipelines under the influence of the body wave of earthquake, *Fourth National Congress of Civil Engineering*, Tehran, Iran.
- [14] Saberi, M., Behnamfar, F. and Vafaean, M. (2010). Investigation of buried continuous pipelines under the influence of wave propagation, *Fifth National Congress of Civil Engineering*, Mashhad, Iran.
- [15] Leon, R. L. and Wang, M., (1978). Performance of underground pipelines in earthquake. IN DIVISION, A. G. E. (Ed.) *Earthquake engineering and soil dynamcs*. New York, American Society of Civil Engineers.
- [16] Lee, H., (2010). *Finite element analysis of a buried pipeline*, University of Manchester, 198 pages.
- [17] Hassanzade Avval, A., Rahmani, H., and Abrishami, S. and Yousefi Samangani, A., (2011). 3D evaluation of the effect of soil type on the seismic behavior of the pile group in respect to the effect of pile-soil effect, *Fourth National Conference on Rehabilitation and Preserving of Memorial Buildings*, Khomein, Iran.
- [18] Blordy, V., Bakhshi, A. and Tonekaboni, M., (2012). Parametric Analysis of Buried Steel Pipelines at the intersection of active faults, *Sharif Civil Engineering Journal*, Volume 28, Number 3, 99-107.