



## تأثیر پارامترهای هندسی بر اندرکنش دینامیکی خاک و لوله‌های مدفون در پای شیروانی‌ها

سید مجدالدین میر محمد حسینی<sup>۱</sup>، حسین حکیمی نژاد<sup>۲</sup>

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه

صنعتی امیرکبیر

<sup>۱</sup> mirh53@yahoo.com

<sup>۲</sup> hoseinhakimi@aut.ac.ir

### خلاصه

از جمله پارامترهای هندسی تأثیرگذار بر عملکرد خطوط لوله مدفون عبوری از پای شیروانی می‌توان به قطر و عمق قرارگیری لوله و فاصله از پای شیروانی اشاره کرد. در این تحقیق با استفاده از تحلیل عددی، تأثیر این عوامل بر روی لوله با راستای عمود بر حرکت شیب در شرایط وقوع زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی عددی به صورت دوبعدی و با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC انجام شده که در آن برای مصالح شیروانی، مدل الاستوپلاستیک موهر-کلمب و برای المان‌های تیر، رفتار الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. بارگذاری لرزه‌ای به صورت بار هارمونیک سینوسی از کف به مدل اعمال شده است. با فرض نسبت ثابت قطر به ضخامت، بررسی نتایج نشان می‌دهد که مقدار نیروها در مقطع، با قطر لوله رابطه مستقیم و با عمق قرارگیری آن رابطه عکس خواهد داشت. هرچه زاویه شیب بیشتر باشد، تأثیر فاصله از شیروانی بر کاهش نیروها بیشتر خواهد بود و هم‌چنین با افزایش عمق لوله، حداکثر نیروها در مقطع، در فاصله دورتری از پای شیروانی رخ می‌دهند.

**کلمات کلیدی:** لوله مدفون، پارامتر هندسی، شیب ناپایدار، زلزله، اندرکنش خاک و لوله.

### ۱. مروری بر مطالعات گذشته

گاهی اوقات شرایط توپوگرافی منطقه و برخی ملاحظات دیگر اعم از اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و ... ایجاب می‌کند که خطوط لوله مدفون از پای شیروانی‌های خاکی عبور نمایند. این شیروانی‌ها در حالت استاتیکی پایدار می‌باشند اما در برخی موارد، ضریب اطمینان استاتیکی آنها به اندازه‌ای پایین است که با تحریک ناشی از زلزله، ناپایدار شده و دچار تغییرشکل‌های دائمی خواهند شد. بسته به زاویه عبور از پای شیروانی، خط لوله متحمل تنش‌ها و تغییرشکل‌های مختلفی خواهد شد. یکی از این حالات، عبور خط لوله به صورت عمود بر راستای حرکت شیروانی خواهد بود که موضوع این پژوهش می‌باشد. برای بررسی خطوط لوله مدفون، محققین از روش‌های مختلف تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی استفاده کرده‌اند. Liu & Michael (۱۹۹۷) O'Rourke براساس نیروهای اندرکنشی غیرخطی بین لوله و خاک (خاک به صورت فنر) و رابطه Remberg-Osgood برای مواد لوله، لوله را به صورت یک تیر به همراه این فنرهای محوری و جانبی مدل کردند [۱]. Michele Maugeri و همکاران (۲۰۰۴) لوله را به صورت الاستیک فرض کرده و سه ناحیه مختلف با توجه به مقدار جابجایی نسبی بین خاک و لوله تعریف کردند. نتایج آنالیزها نشان می‌دهد که ممان خمشی و نیروی برشی در لوله در مرز بین ناحیه پایدار و ناپایدار بیشترین مقادیر را دارا می‌باشند [۲]. Youshizake & Sakanoue (۲۰۰۴) به منظور ارزیابی رفتار تغییرشکل‌پذیری خط لوله تحت جابجایی‌های ماندگار زمین (PGD) با استفاده از یک مدل اجزا محدود، اندرکنش خاک و لوله را در راستای جانبی لوله بررسی کرده‌اند. در این روش به منظور شبیه‌سازی اندرکنش به دلیل جابجایی نسبی جانبی بین خاک و لوله، در مدل عددی، لوله در راستای افقی جابجا می‌شود [۳]. Prisco & Galli (۲۰۰۶) تعدادی آنالیز عددی به روش اجزا محدود دو بعدی تحت بارگذاری‌های مونوتونیک برای ارزیابی اندرکنش در شرایط دو بعدی انجام دادند. لوله به صورت یک جسم دایره‌ای صلب مدل شده که در یک محیط همگن با معیار موهر-کلمب قرار

<sup>1</sup> Permanent Ground Deformation

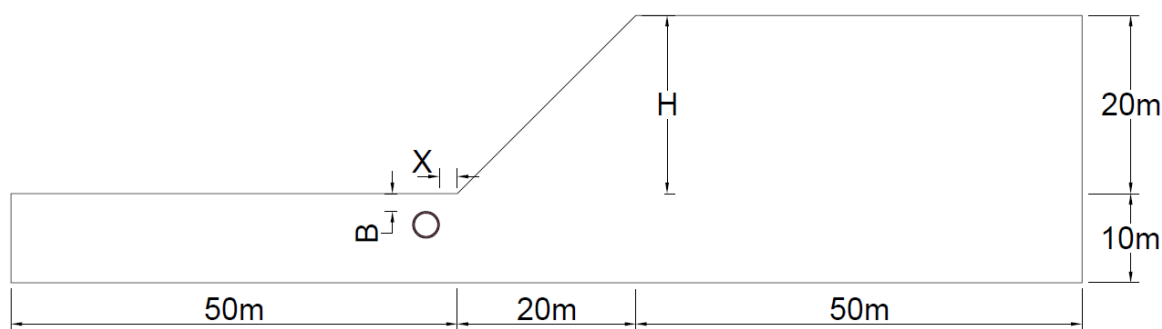


گرفته‌است [۴]. Michael Georgiadis (۱۹۹۱) تعدادی آزمایش بر روی مدل لوله قرار گرفته در رس برای مطالعه اثر سرعت بارگذاری بر روی نیروی رانشی انجام داد و توانست نمودار تغییرات نیروی رانشی بر واحد طول لوله در مقابل سرعت بارگذاری را بدست آورد [۵]. در این پروژه، خط لوله در پایین شیروانی و در یک لایه افقی پایدار مدل شده نه درون توده لغزنده شیروانی، بنابراین به دلیل وجود توده مقاوم خاک در مقابل لوله، تغییرشکل جانبی نسبتاً کمی در طول آن ایجاد می‌شود. در اینجا به دلیل وارد شدن نیرو از طرف توده لغزنده شیروانی به مقطع لوله و در مقابل آن، مقاومت توده خاک جلوی آن در برابر حرکت جانبی، مقطع دچار تغییرشکل‌هایی می‌شود که نتیجه آن بروز نیروهای مختلف در جدار لوله خواهد بود. در واقع می‌توان گفت که به دلیل قرارگیری لوله در این مکان، سهم تغییرشکل مقطع در ایجاد تنش‌ها و کرنش‌ها به مراتب بیشتر از تغییرشکل جانبی در طول آن می‌باشد.

## ۲. مدل‌سازی عددی

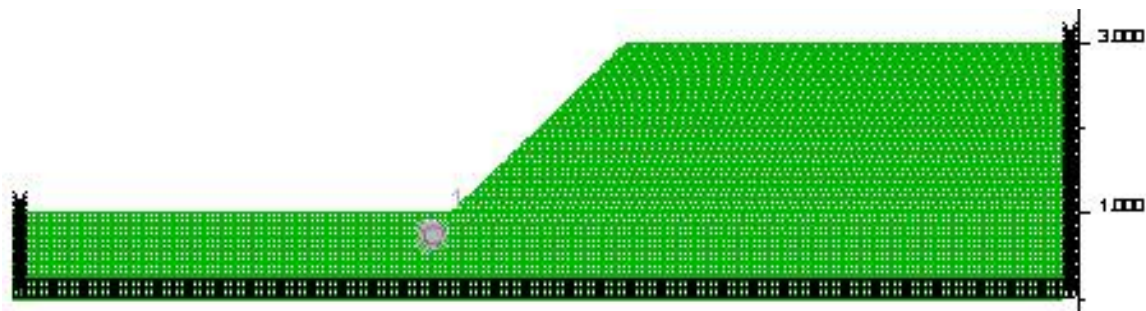
با توجه به اینکه هدف اصلی در این پروژه بررسی نحوه اندرکنش شیروانی با لوله و تاثیر آن بر مقدار نیروهای بوجود آمده در مقطع لوله بوده و ارزیابی رفتار خط لوله در طول آن موردنظر نمی‌باشد، از مدل دو بعدی استفاده شده است. در ضمن با عنایت به اینکه سازه‌هایی مانند خطوط لوله، در جهت عمود بر مدل دارای امتداد بی‌نهایت هستند شرایط کرنش مسطح در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی از نسخه ۴٫۰ نرم‌افزار FLAC استفاده شده است زیرا این نرم افزار علاوه بر امکان تعریف مدل‌های رفتاری پیچیده، امکان در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه و محاسبه تغییرشکل‌های بزرگ، تعریف المان‌های واسطه و شرایط لغزش پیرامون لوله و تحلیل دینامیکی غیرخطی را داراست و نسبت به سایر نرم‌افزارهای موجود از سابقه طولانی در تحلیل پروژه‌های ژئوتکنیکی برخوردار است. بنابراین گزینه بسیار خوبی برای آنالیز دینامیکی لوله‌های مدفون واقع در پای شیروانی‌های ناپایدار در شرایط لرزه‌ای می‌باشد.

با توجه به ابعاد شیروانی‌های موجود در طبیعت، هندسه شیروانی و خط لوله مطابق شکل ۱ انتخاب شده است. محل قرارگیری لوله با دو پارامتر  $X$  و  $B$  تعیین می‌شود. پارامتر  $B$  نشان‌دهنده عمق لوله مدفون بوده و برابرست با فاصله سطح زمین تا بالای لوله. پارامتر  $X$  فاصله لوله تا پای شیروانی را نشان می‌دهد و برابرست با فاصله نقطه شروع شیب تا لبه خارجی سمت راست لوله. در ضمن، قطر بیرونی لوله با  $D$  و ضخامت آن با  $t$  نشان داده می‌شود. به صورت پیش فرض،  $B=۱٫۵m$ ،  $X=۱m$ ،  $D=۲m$ ،  $\theta=۴۵^\circ$ ،  $t=۱٫۵cm$  انتخاب شده‌اند. برای انجام مطالعات پارامتریک و بررسی تاثیر هر کدام از این متغیرها، مقادیر مختلفی برای آنها در نظر گرفته می‌شود.



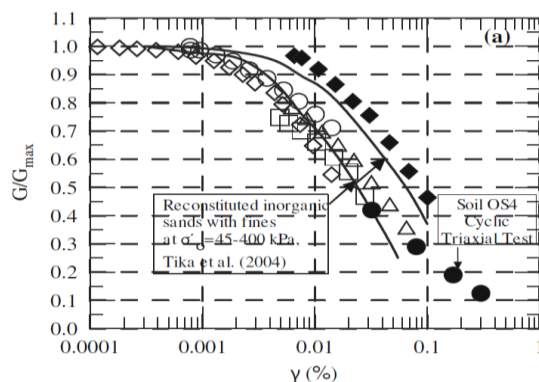
شکل ۱- هندسه شیروانی و خط لوله

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مدل تهیه شده دارای ۱۰۴۰۰ زون و ۱۰۷۰۱ گره بوده و شبکه‌بندی آن به گونه‌ایست که بزرگترین زون دارای ابعاد  $۰٫۵m \times ۰٫۵m$  می‌باشد. برای تحلیل استاتیکی، در وجوه جانبی از امکان آزادی حرکت در راستای افقی و در هر دو راستای افقی و قائم ممانعت صورت گرفته است. در مرحله دوم آنالیز که وجه تحتانی مدل تحت اثر بار دینامیکی قرار می‌گیرد، شرایط مرزی مدل در وجوه جانبی را از حالت ساده به حالت مرزهای میدان آزاد تغییر داده اما هم‌چنان کف مدل به صورت گیردار باقی می‌ماند.



شکل ۲- نحوه شبکه‌بندی مدل

با توجه به وجود اطلاعاتی در مورد پارامترهای مقاومتی و رفتاری خاک‌های سیمانته، سعی شده است که پارامترهای اختصاص داده شده در مدل تا حد زیادی مشابه این نوع خاک‌ها باشد. مدول برشی حداکثر خاک‌های ماسه سیمانی وابسته به پارامترهای مختلفی از جمله دانه‌بندی، درجه تخلخل، فشار همه جانبه و درصد سیمان‌تاسیون می‌باشد. مدول سختی با افزایش کرنش برشی با توجه به عمق دفن و میزان سیمان‌تاسیون می‌تواند به صورت خطی یا غیرخطی کاهش پیدا کند [۶]. Tika و همکاران (۲۰۱۰) یک سری آزمایش با استفاده از دستگاه ستون تشدید بر روی نمونه‌های ماسه سیمانی انجام دادند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که این نوع ماسه‌ها دارای رفتار غیرخطی بوده و با افزایش کرنش برشی، مدول برشی آنها به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد [۷]. نتایج آنها به صورت نمودار تغییرات مدول برشی نسبت به کرنش برشی در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- تغییرات مدول برشی در مقابل کرنش برشی برای خاک‌های ماسه سیمانی [۷]

بنابراین در این تحقیق، برای کاهش غیرخطی مقادیر مدول برشی به ازای افزایش کرنش برشی مطابق نمودار بالا، رابطه (۱) با استفاده از زبان برنامه‌نویسی FISH در نرم‌افزار کدنویسی شده است:

$$\frac{G}{G_{max}} = -4327.5\gamma^3 + 657.95\gamma^2 - 34.782\gamma + 1.01 \quad (1)$$

که در آن،  $G$  مدول برشی و  $\gamma$  کرنش برشی می‌باشد.

جنس لوله از نوع فولاد کربنی است و مقطع آن به صورت تعدادی المان تیری با عرض واحد و رفتار الاستیک خطی مدل شده که در محل گره‌ها به این نقاط متصل شده‌اند. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات خاک و لوله مدفون ارائه شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات خاک

وزن مخصوص ( $\rho$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	چسبندگی (C) (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) (deg)	مدول یانگ ( $E_{max}$ ) (MPa)	ضریب پواسون ( $\nu$ )
۱۸۰۰	۳۰	۳۵	۱۰۰	۰٫۳



جدول ۲- مشخصات لوله مدفون

وزن مخصوص ( $\rho$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	ضریب پواسون ( $\nu$ )	مدول یانگ ( $E_{\max}$ ) (GPa)
۷۸۵۰	۰٫۳	۲۲۰

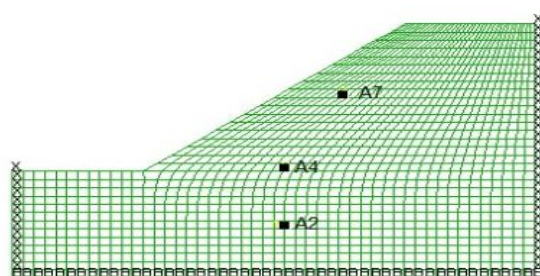
برای اعمال بار دینامیکی، مولفه افقی شتاب به صورت یک موج سینوسی با دامنه  $0.5g$ ، فرکانس بارگذاری  $5$  هرتز و در مدت زمان  $15$  ثانیه به کف مدل اعمال شده است. از آنجا که مدل رفتاری مورد استفاده، موهر-کلمب است و بخش قابل توجهی از انرژی به دلیل وقوع جریان پلاستیک مستهلک می‌شود، ضریب میرایی  $0.5$  درصد در نظر گرفته شده است. سطح مشترک المان‌های لوله و خاک به صورت غیرمتصل مدل شده تا ایندو بتوانند نسبت به هم جابجایی داشته و لغزش بوجود آمده در سطح مشترک را مدل نمایند. در جدول ۳ مشخصات المان واسطه نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات المان واسطه

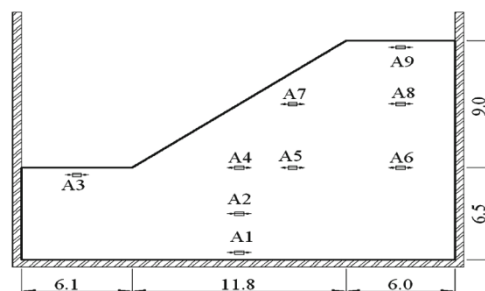
چسبندگی (C) (kPa)	زاویه اصطکاک ( $\phi$ ) (deg)	سختی برشی ( $K_s$ ) (MPa/m)	سختی قائم ( $K_n$ ) (MPa/m)
۲۰	۲۵	۲٫۶	۲۶

۳. آنالیز اعتبارسنجی مدل عددی

با توجه به عدم گستردگی کافی مطالعات در زمینه خطوط لوله گذرنده از پای شیروانی و نبود مدل آزمایشگاهی مناسب برای ساخت مدل عددی آن و انطباق با شرایط واقعی، برای اعتبارسنجی مدل عددی از یک مدل شیب استفاده شده تا صحت و درستی فرضیات مربوط به تحلیل دینامیکی مورد بررسی قرار گیرد. مدل فیزیکی در نظر گرفته شده، توسط Yuzhen Yu و همکاران (۲۰۰۷) در دانشگاه Tsinghua چین به منظور انجام یکسری آزمایشات سانتریفیوژ ساخته شده است [۸]. مدل‌ها درون یک محفظه با دیواره‌های صلب با ابعاد درونی  $495$  میلی متر (طول)،  $200$  میلی متر (عرض) و  $350$  میلی متر (ارتفاع) تهیه شده و مصالح مورد استفاده برای این مطالعه، ماسه خشک پکن می‌باشد. از آنجاییکه آزمایش‌ها در دستگاه سانتریفیوژ تحت شتاب گریز از مرکز  $50g$  انجام می‌شوند، ابعاد مدل اصلی  $50$  برابر بزرگتر از مدل آزمایشگاهی خواهد بود. ماسه مورد استفاده دارای چگالی  $1660 \text{ Kg/m}^3$  و تراکم نسبی  $0.69$  است. بارگذاری دینامیکی به صورت بار هارمونیک سینوسی با دامنه  $0.31g$  و فرکانس  $0.6$  هرتز به مدت  $25$  ثانیه به کف مدل وارد شده است. در مدل آزمایشگاهی، دیواره‌ها بدون اصطکاک ساخته شده و به اندازه‌ای صلب می‌باشند که کرنش در راستای Z (عمود بر صفحه) بوجود نمی‌آید. بنابراین می‌توان با استفاده از مدل دوبعدی و در نظر گرفتن شرایط کرنش مسطح در تحلیل، نتایج حاصل از تحلیل عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده و میزان حساسیت و دقت مدل عددی ساخته شده را تعیین نمود. در اشکال ۴- الف و ۴- ب به ترتیب مدل فیزیکی آزمایش سانتریفیوژ و مدل عددی ساخته شده در نرم افزار FLAC نشان داده شده‌اند. نقاط مشخص شده روی مدل، بیانگر گره‌های معادل شتاب‌سنج‌ها می‌باشند.



شکل ۴- ب- مدل عددی



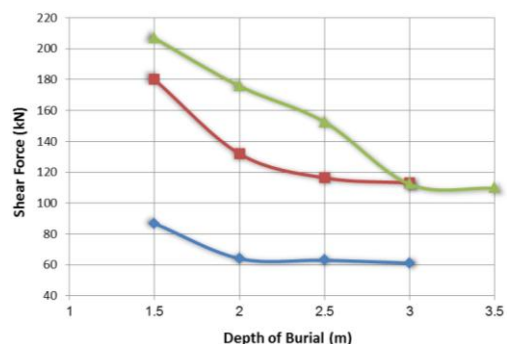
شکل ۴- الف- مدل فیزیکی آزمایش سانتریفیوژ



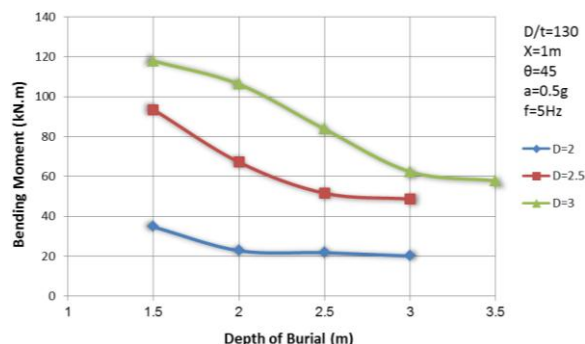
با مقایسه مقادیر شتاب اندازه گیری شده در شتاب‌سنج‌های A2، A4 و A7 و تاریخچه شتاب بدست آمده در گره معادل آنها دیده می‌شود که جواب‌ها در دامنه تغییرات مناسبی با نتایج آزمایشگاهی قرار دارند به طوری که حداکثر اختلاف، مربوط به شتاب‌سنج A7 و در حدود ۱۷٪ می‌باشد. از عوامل بروز اختلاف، وجود خطاهایی در اندازه‌گیری آزمایشگاهی پارامترهای مورد نیاز و هم چنین در نظر گرفتن مدل رفتاری موهر-کلمب برای خاک می‌باشد که به طور کامل مطابق با رفتار واقعی آن نخواهد بود. با انجام این آنالیز و مقایسه با مدل آزمایشگاهی به این نتیجه می‌رسیم که فرضیات در نظر گرفته شده برای تحلیل دینامیکی مدل، دارای عملکرد مناسبی بوده و تا حد زیادی قابل قبول می‌باشند. بنابراین می‌توان از این فرضیات برای انجام مدل‌سازی اصلی نیز استفاده کرد.

#### ۴. مطالعات پارامتریک

۱- **قطر و عمق لوله:** قطر لوله به عنوان پارامتریست که اصولاً در هنگام طراحی خط لوله با توجه به دبی جریان عبوری از آن که می‌تواند شامل آب، نفت، گاز و ... باشد تعیین شده و معمولاً وابسته به توپوگرافی منطقه و شرایط اجرایی نمی‌باشد. اما عمق قرارگیری لوله مدفون کاملاً وابسته به توپوگرافی منطقه و شرایط اجرایی خواهد بود. در واقع ابتدا قطر مشخص شده سپس عمق قرارگیری آن انتخاب می‌شود. بنابراین بررسی حالت‌های مختلف که اثر هر دو پارامتر را به صورت هم‌زمان در نظر بگیرد، جهت طراحی و اجرای بهینه خطوط لوله بسیار کارساز خواهد بود. در این قسمت، تعدادی مطالعه پارامتریک بر روی لوله با قطرها و اعماق مختلف انجام گرفته است. به جهت مطابقت ابعاد لوله‌های انتخابی با لوله‌های مرسوم کاربردی، نسبت  $D/t=130$  برای هر سه قطر انتخابی در نظر گرفته شده است. بنابراین ضخامت جدار لوله‌ها به ترتیب برابر ۱٫۵، ۱٫۹ و ۲٫۳ سانتی‌متر می‌باشند. در اشکال ۵ و ۶ به ترتیب، نمودارهای تغییرات ممان خمشی و نیروی برشی ماکزیمم مقطع لوله در مقابل عمق دفن به ازای مقادیر مختلف قطر لوله نشان داده شده‌اند.



شکل ۶- تغییرات نیروی برشی ماکزیمم در مقابل عمق دفن



شکل ۵- تغییرات ممان خمشی ماکزیمم در مقابل عمق دفن

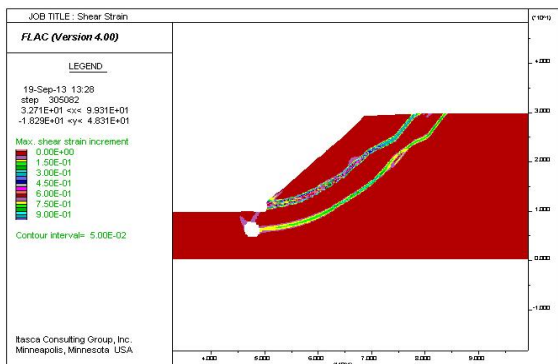
همان‌طور که دیده می‌شود، به‌طور کلی دو نمودار روند مشابهی دارند. لوله در هر عمقی که قرار گرفته باشد، با افزایش قطر آن، ممان خمشی و نیروی برشی در مقطع افزایش خواهد یافت. هرچه عمق دفن کمتر باشد، افزایش قطر تاثیر بیشتری بر روی نیروها می‌گذارد. با افزایش قطر از ۲ تا ۳ متر، بیشترین میزان افزایش ممان خمشی و نیروی برشی مربوط به عمق ۱٫۵ متر بوده و به ترتیب برابر ۳۲٪ و ۱۷۰٪ می‌باشد. کمترین افزایش نیز مربوط به عمق ۳ متر و به ترتیب برابر ۲۰٪ و ۸۵٪ خواهد بود.

هرچه قطر لوله بیشتر باشد، تاثیر عمق قرارگیری بر روی مقادیر خمش و برش زیادتر خواهد بود. در لوله با قطر ۲ متر، با افزایش عمق از ۱٫۵ تا ۲ متر شاهد کاهش خمش و برش هستیم. اما پایین‌تر از این عمق، تقریباً مقدار نیروها ثابت می‌ماند. برای لوله با عمق ۲٫۵ متر، عمقی که بعد از آن نیروها ثابت می‌مانند برابر ۲٫۵ متر می‌باشد. برای لوله با قطر ۳ متر، یک مدل اضافه با عمق ۳٫۵ متر تهیه شده است. دیده می‌شود که در این مقطع، بعد از عمق ۳ متر شاهد ثابت ماندن نیروها هستیم. مشاهده می‌شود که برای لوله‌ها با قطرهای مختلف، وقتی  $B/D=1$  شود، دیگر افزایش عمق تاثیری در کاهش نیروها نداشته و می‌توان گفت که این نسبت، بیانگر عمق بهینه جهت اجرای خط لوله می‌باشد.

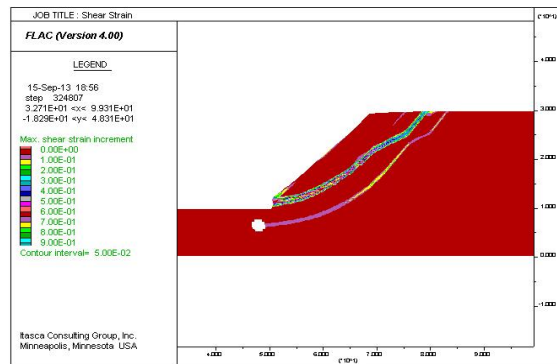
یکی از عوامل موثر در مقدار ممان خمشی و نیروی برشی بوجود آمده در مقطع لوله، میزان کرنش برشی ایجاد شده در توده خاک پشت لوله می‌باشد. در واقع این افزایش کرنش برشی به معنای افزایش جابجایی نسبی در توده خاک پشت لوله خواهد بود. با افزایش قطر، سختی مقطع کمتر شده و در نتیجه کرنش برشی در پشت مقطع افزایش یافته و سطح لغزش قوی‌تری تشکیل می‌شود. این افزایش کرنش، سبب افزایش نیروها در مقطع لوله



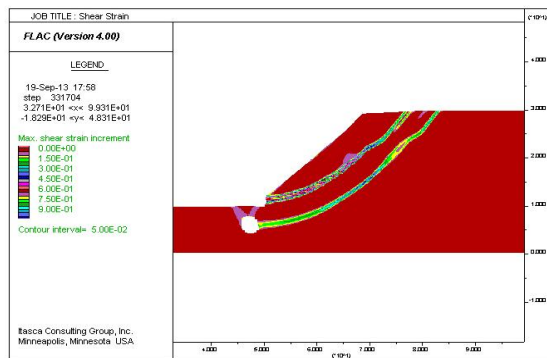
خواهد شد. اما با افزایش عمق، حجم توده مقاوم خاک در برابر حرکت جانبی افزایش یافته که منجر به کاهش کرنش برشی و نیروهای بوجود آمده در مقطع لوله خواهد شد. در اشکال ۷ تا ۹، تاثیر افزایش قطر برای لوله در عمق ۲/۵ متری نشان داده شده است. هرگاه مقدار کرنش برشی به حدی زیاد باشد که باعث تشکیل سطح لغزش در پشت لوله شود، نیروی اعمالی ناشی از حرکت گوه گسیختگی، تنش و کرنش در لوله را به شدت افزایش خواهد داد.



شکل ۸- کانتور کرنش برشی شیروانی با لوله به قطر ۲/۵ متر

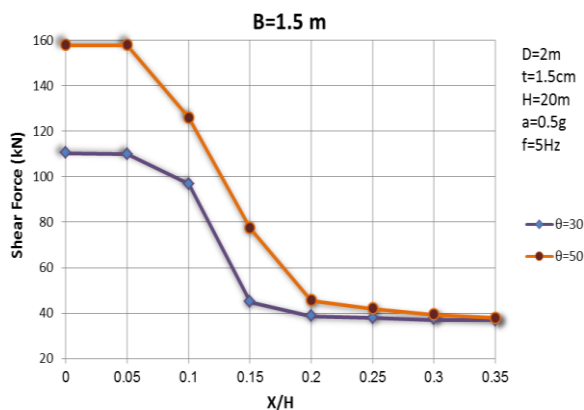


شکل ۷- کانتور کرنش برشی شیروانی با لوله به قطر ۲ متر

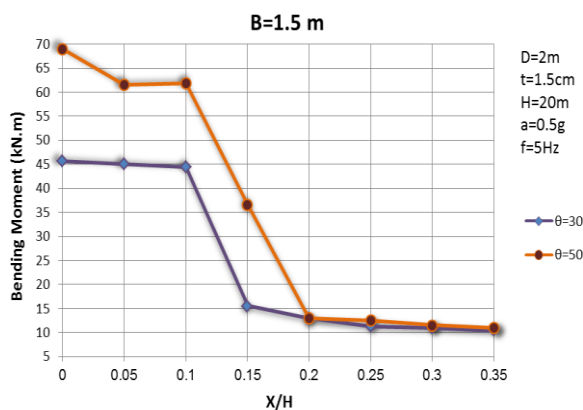


شکل ۹- کانتور کرنش برشی شیروانی با لوله به قطر ۳ متر

۲- فاصله از پای شیروانی: یکی از پارامترهای مربوط به مکان قرارگیری خط لوله، فاصله از پای شیروانی (X) می‌باشد. هدف از این مطالعات، تعیین میزان تاثیر فاصله از پای شیروانی بر مقدار نیروها و همچنین تعیین حداکثر فاصله موثری که بعد از آن شاهد تغییرات محسوسی در نیروها نباشیم، خواهد بود. در اشکال ۱۰ و ۱۱ نمودار تغییرات ممان خمشی ماکزیمم و نیروی برشی ماکزیمم مقطع در مقابل نسبت X/H به ازای عمق ۱/۵ متر نشان داده شده است.



شکل ۱۱- تغییرات نیروی برشی ماکزیمم در مقابل نسبت X/H

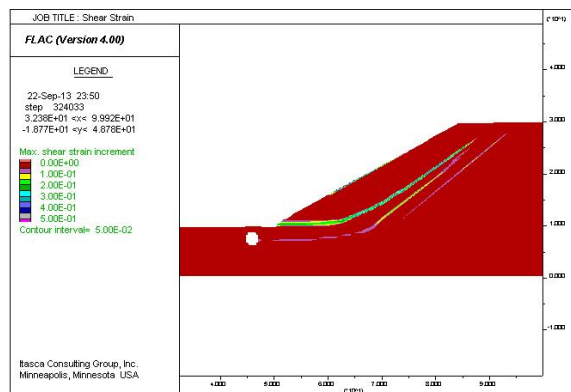


شکل ۱۰- تغییرات ممان خمشی ماکزیمم در مقابل نسبت X/H

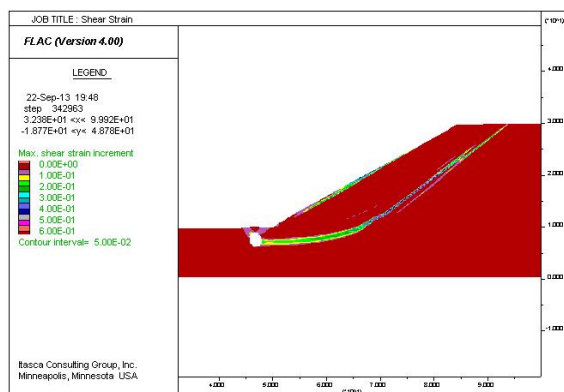




برای شیروانی ۳۰ درجه با افزایش  $X/H$  از ۰ تا ۰٫۱، ممان خمشی و نیروی برشی کاهش اندکی دارند اما زمانیکه این نسبت به ۰٫۱۵ می‌رسد شاهد کاهش چشمگیر در مقدار نیروها می‌باشیم. بعد از این مقدار، تغییرات بسیار اندک بوده و تقریباً می‌توان گفت که افزایش فاصله تاثیر محسوسی در کاهش خمش و برش نخواهد داشت. علت این کاهش زیاد، جابجایی سطح لغزش از پشت لوله به پای شیروانی و به دنبال آن از بین رفتن گوه گسیختگی در پشت مقطع لوله می‌باشد. با افزایش  $X/H$  از ۰ تا ۰٫۱، سطح لغزش در پشت مقطع شکل می‌گیرد اما وقتی این نسبت به ۰٫۱۵ می‌رسد، حجم توده خاک مقاوم در برابر حرکت شیروانی افزایش یافته که سبب افزایش مقاومت در برابر حرکت جانبی خواهد شد. بنابراین، سطح گذرنده از پای شیروانی زودتر به حالت بحرانی رسیده و لغزش در آن اتفاق می‌افتد. در اشکال ۱۲ و ۱۳ روند این تغییرات نشان داده شده است.



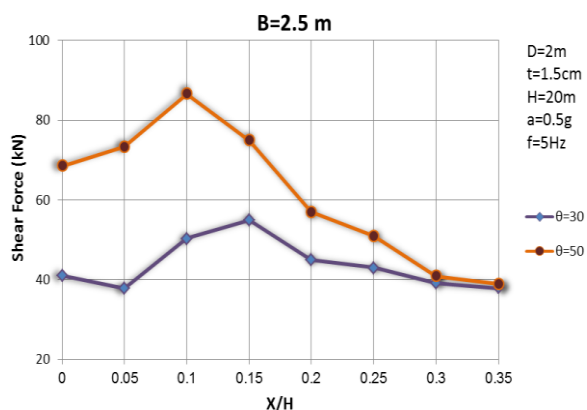
شکل ۱۳- کانتور کرنش برشی شیروانی ۳۰ درجه به ازای  $X/H=0.15$



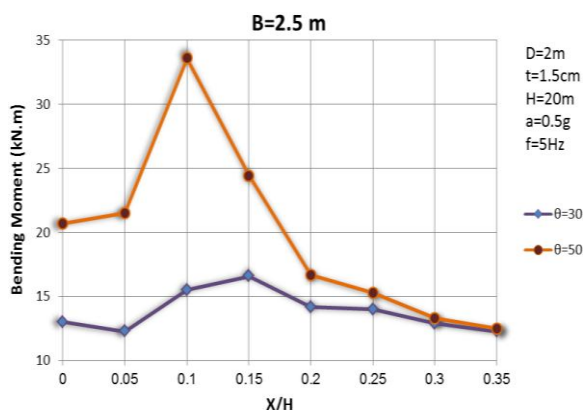
شکل ۱۲- کانتور کرنش برشی شیروانی ۳۰ درجه به ازای  $X/H=0.1$

در کل می‌توان گفت که وقتی لوله در اعماق کم قرار می‌گیرد، افزایش فاصله از پای شیروانی تا حد  $X/H=0.2$  بسیار مفید بوده اما بیشتر از آن، تاثیر زیادی در کاهش نیروها نخواهد داشت. هم‌چنین درصد کاهش نیروها در شیروانی ۵۰ درجه به مراتب بیشتر از ۳۰ درجه می‌باشد که این امر نشان دهنده تاثیر بیشتر افزایش فاصله بر روی کاهش نیروها در شیب‌های تندتر خواهد بود. به علاوه برای ممان خمشی با رسیدن به  $X/H=0.2$  و برای نیروی برشی با رسیدن به  $X/H=0.3$ ، مقدار نیروها در مقطع لوله برای هر دو شیروانی با هم برابر می‌شوند و می‌توان گفت که در این فواصل، اثر زاویه شیروانی از بین می‌رود.

در حالت دوم، لوله در عمق ۲٫۵ متری قرار گرفته و نتایج مربوط به آن در اشکال ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده اند.



شکل ۱۵- تغییرات نیروی برشی ماکزیمم در مقابل نسبت  $X/H$



شکل ۱۴- تغییرات ممان خمشی ماکزیمم در مقابل نسبت  $X/H$

با مشاهده نمودارها می‌توان گفت که وقتی عمق دفن لوله بیشتر می‌شود، مقدار حداکثر این نیروها در پای شیروانی اتفاق نمی‌افتد بلکه حالت ماکزیمم زمانی اتفاق می‌افتد که لوله کمی از شیروانی دور می‌شود. دلیل این امر اینست که وقتی لوله، نزدیک شیروانی ولی در عمق بیشتری قرار دارد، کمتر تحت تاثیر دامنه حرکت شیب قرار می‌گیرد، اما با کمی افزایش فاصله، تاثیر حرکت شیب بر لوله بیشتر خواهد شد. در نتیجه، جابجایی‌ها در توده خاک پشت لوله و به تبع آن تغییر شکل در مقطع بیشتر خواهد شد. اما از یک نقطه حداکثری به بعد، به علت افزایش حجم توده خاک مقاوم در پشت لوله،



مقدار تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد. با مقایسه نتایج مربوط به دو عمق مختلف می‌بینیم که وقتی لوله در عمق ۱/۵ قرار دارد، با رسیدن  $X/H$  به ۰/۲، دیگر افزایش فاصله تاثیر زیادی در کاهش مقدار ممان خمشی، نیروی برشی و محوری ندارد، اما زمانیکه عمق مدفون افزایش یافته و به ۲/۵ متر می‌رسد، این نسبت تا ۰/۳ افزایش خواهد یافت. به عبارتی می‌توان گفت که هرچه لوله عمیق‌تر باشد، تا فاصله بیشتری تحت تاثیر حرکت شیروانی قرار خواهد گرفت.

## ۵. نتیجه‌گیری

- لوله در هر عمقی که قرار گرفته باشد، با در نظر گرفتن نسبت ثابت قطر به ضخامت دیده می‌شود که با افزایش قطر آن، ممان خمشی و نیروی برشی در مقطع افزایش خواهند یافت. هرچه عمق دفن کمتر باشد، افزایش قطر تاثیر بیشتری بر روی خمش و برش می‌گذارد. هم‌چنین به ازای لوله با قطرهای مختلف می‌بینیم که با افزایش عمق، خمش و برش کاهش می‌یابند به طوری که درصد آن برای لوله‌های بزرگتر، بیشتر خواهد بود.

- برای لوله با قطرهای مختلف، وقتی  $B/D$  (نسبت عمق به قطر) برابر ۱ می‌شود، دیگر افزایش عمق تاثیری در کاهش نیروها نداشته و می‌توان گفت که این نسبت، بیانگر عمق بهینه جهت اجرای خط لوله می‌باشد.

- هرچه زاویه شیروانی افزایش یابد، درصد کاهش نیروها به علت افزایش فاصله از پای شیروانی نیز بیشتر خواهد شد و به عبارتی، افزایش فاصله در این نوع از شیب‌ها مفیدتر می‌باشد. با قرار دادن لوله در دو عمق ۱/۵ و ۲/۵ متری شاهد رفتار متفاوتی می‌باشیم. در عمق ۱/۵ متری، ماکزیمم نیرو در پای شیروانی ایجاد شده و با افزایش فاصله به یکباره شاهد کاهش چشمگیر در نمودار می‌باشیم. اما از  $X/H=0.2$  به بعد، تاثیر شیروانی بر نیروها به شدت کم شده و نمودار با یک شیب بسیار ملایم به روند کاهشی خود ادامه می‌دهد. برای عمق ۲/۵ متر، حداکثر نیرو در یک فاصله کمی از پای شیروانی اتفاق می‌افتد. در اینجا، از  $X/H=0.3$  به بعد، تاثیر شیروانی کاهش یافته و شیب نمودار بسیار کم می‌شود. در واقع هرچه عمق بیشتر شود، تاثیر گذاری شیروانی تا فاصله دورتری ادامه خواهد داشت.

- با مقایسه نتایج مربوط به دو عمق متفاوت می‌بینیم که در اکثر مواقع با افزایش عمق، مقدار نیروها کاهش می‌یابند. زمانیکه لوله در اعماق تقریباً کمی اجرا می‌شود، هر چه فاصله از شیروانی افزایش یابد، مفید خواهد بود. اما وقتی که امکان اجرا در اعماق بیشتر مهیا باشد، خط لوله یا باید در پای شیروانی و یا در فاصله‌ای دورتر از منطقه بحرانی با ماکزیمم نیروها اجرا شود.

## ۶. مراجع و منابع

1. O'Rourke, M., Liu, X.; "Behaviour of continuous pipeline subject to transverse PGD", *International journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, No. 10, 1997.
2. Maugeri, M., Casamichela, P. and Motta, E.; "Non- linear analysis of soil-pipeline interaction in unstable slopes", *Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August, 2004.
3. Yoshizaki, K. and Sakanoue, T.; "Analytical study on soil-pipeline interaction due to large ground deformation", *Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August, 2004.
4. Prisco, C. and Galli, A.; "Soil-pipe interaction under monotonic and cyclic loads: experimental and numerical modeling", *Advance in Geomaterial and Structures*, 2006.
5. Georgiadis, M.; "Landslide drag forces on pipelines", *Soils and Foundations*, Vol. 31, p. p. 156-161, 1991.
6. Park, K., Michael, S., Seo, W. and Stokeo, K.H.; "Field measurements of linear and nonlinear shear moduli of cemented alluvium", *9<sup>th</sup> US National and 10<sup>th</sup> Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Toronto, Canada, July, 2010.
7. Tika, Th.; "Dynamic properties of cemented soils from Cyprus", *Bull Eng Geol Environ*, Vol. 69, p. p. 295-307, 2010.
8. Yu, Y., Deng, L., Sun, X. and Lu, H.; "Centrifuge modeling of a dry sandy slope response to earthquake loading", *Bull Earthquake Eng*, Vol. 6, p. p. 447-461, 2008.