مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۸، شماره‌ی ۳، ص. ۹۹-۱۰۷

Original Article

تحلیل پارامتریک خطوط لوله‌ی فولادی مدفون در تقاطع گسل‌های فعال

وهاب بلوردی (کارشناس ارشد)
علی بخشی* (دانشیار)
محمد تنکابنی‌پور (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

حساسیت خطوط لوله‌ی فولادی در برابر خرابی ناشی از حرکات بزرگ زمین در زلزله‌های متعدد به اثبات رسیده است. در این زمینه برخی از پژوهشگران از فرضیات ساده‌کننده‌یی برای مدل‌سازی خط‌های لوله استفاده کرده‌اند. در این مطالعه شبیه‌سازی اثر گسلش بر لوله‌ی فولادی مدفون با دقت بیشتری بررسی می‌شود. در این بین مهم‌ترین عامل در تعیین ظرفیت پاسخ لوله، مدل‌سازی اندرکنش میان خاک و لوله است. از آنجا که تأثیر متقابل نیروهای اندرکنشی و مقاوم در لوله به‌واسطه‌ی تغییر پارامترهای لوله نقش بسزایی در پاسخ لوله دارند، پارامترهای مؤثر بر پاسخ لوله مانند قطر، ضخامت، زاویه‌ی تقاطع با صفحه‌ی گسل، عمق دفن، و نوع مصالح مصرفی در تحلیل عددی غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج این تحلیل‌ها تأثیر مثبت افزایش ضخامت، زاویه‌ی تقاطع، و کاهش عمق دفن را در پایین‌آمدن درصد خرابی لوله نشان می‌دهند. همچنین مقایسه با نتایج مطالعات قبلی حاکی از دست بالابودن نتایج آن‌هاست.

واژگان کلیدی: خط لوله‌ی مدفون، تحلیل پارامتریک، تغییرشکل‌های بزرگ، گسل فعال.

bolvardi@alum.sharif.edu
bakhshi@sharif.edu
tonekabonipur@yahoo.com

۱. مقدمه

شبکه‌ی خطوط لوله‌ی مدفون در شهرهای بزرگ و صنعتی، وظیفه‌ی اساسی انتقال آب، گاز، نفت و جمع‌آوری فاضلاب را بر عهده دارند. لوله‌های مدفون در کشورهایی واقع در مناطق با لرزه‌خیزی بالا اهمیت فوق‌العاده‌یی دارند. گسیختگی خطوط لوله علاوه‌بر خسارت‌های اقتصادی هنگفت می‌تواند سلامت محیط زیست را نیز در معرض خطر قرار دهد.[۱]

در طی وقوع زلزله‌های مختلفی مثل زلزله‌های ترکیه و تایوان (۱۹۹۹)، خطوط لوله‌ی مدفون در تقاطع گسل به‌شدت آسیب دیدند. این آسیب‌دیدگی‌ها با مقدار و نوع جابجایی گسل‌ها نیز ارتباط مستقیم دارد، به‌طوری که در زلزله‌ی تایوان جابجایی قائم یک گسل حدود ۴ متر گزارش شده و یا در گسل دیگری در ژاپن، بیشینه‌ی حرکت افقی آن در حدود ۲/۱ متر بیان شده است. مسلماً این تحریکات شدید صدمات جبران‌ناپذیری را بر خطوط لوله وارد می‌کند و بر همین اساس نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه و اهمیت بررسی لرزه‌یی خطوط لوله‌ی مدفون روشن می‌شود.[۲]

تاکنون تعداد اندکی از پژوهشگران، رفتار لوله‌های مدفون را در برابر حرکات گسل با استفاده از روش‌های تحلیلی بررسی کرده‌اند. از آنجا که پاسخ خط لوله به حرکات گسل به پارامترهای زیادی وابسته است، هر یک از روش‌های تحلیلی ارائه‌شده به منظور سهولت در فرایند تحلیل، فرضیات ساده‌کننده‌یی را در نظر گرفته‌اند که در نتیجه موجبات کاهش دقت پاسخ‌های برآوردشده را فراهم کرده‌اند. برخی دیگر از پژوهشگران نیز با استفاده از روش‌های عددی نظیر روش عناصر محدود، تأثیر حرکات گسل بر خطوط لوله‌ی مدفون را بررسی و برخی از پارامترها نظیر نیروهای اندرکنشی خاک لوله که نقش بسزایی را در مقدار پاسخ ایفا می‌کنند، در نظر نگرفته‌اند. در ادامه، به مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در این زمینه اشاره‌ی کوتاهی شده است.

در پژوهشی در پاسخ لوله به حرکات گسل از منحنی تغییرشکل یافته‌ی لوله در نزدیکی گسل استفاده شده و نیز از اثرات نیروهای اندرکنشی جانبی خاک ـ لوله صرف‌نظر شده است.[۳] این فرضیات موجب بروز خطا در برآورد پاسخ لوله به حرکات گسل شده‌اند، لذا برخی دانشمندان با اعمال برخی تصحیحات، روش قبلی را بهبود بخشیده و با مدل‌های ارائه‌شده، خط لوله را با المان‌های تیری مدل‌سازی کرده و منحنی تغییرشکل یافته‌ی لوله در محل تقاطع با گسل را به‌صورت یکنواخت در نظر گرفته‌اند.[۴] در ادامه برخی پژوهشگران این انحنا را به‌صورت متغیر و وابسته به شرایط بررسی کردند.[۵و۶]

پژوهشگران دیگری نیز با اذعان به این نکته که لوله‌ها در برابر حرکات گسل رفتار پوسته‌یی از خود نشان می‌دهند، مدل‌سازی با المان‌های پوسته‌یی را برای بررسی خطوط لوله برگزیدند.[۷] اگرچه این مطالعات دقت بیشتری را در برآورد پاسخ لوله

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۳/۵، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱۰/۱۱، پذیرش ۱۳۹۰/۱۱/۱۹.

به حرکات گسل نشان می‌داد، ولیکن در این مطالعات از اثرات نیروهای اندرکنشی خاک و لوله بر پاسخ لوله به حرکات گسل صرف‌نظر شده است. با توجه به اینکه در حالت کلی تأثیر نیروهای اندرکنشی بر پاسخ لوله به حرکات گسل مهم است، مدل‌های مورداستفاده در این مطالعات نیازمند تصحیح است؛ لذا این پژوهشگران لزوم تکمیل و تصحیح تحقیقات خود را پیشنهاد کرده‌اند.

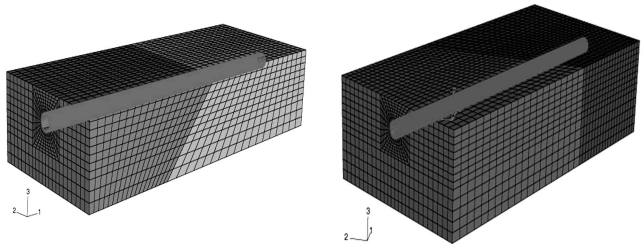
۲. مدل‌سازی، رفتار مصالح و بارگذاری

با استفاده از مفاهیم علم المان محدود در شبیه‌سازی عددی انجام‌شده، این مطالعه نسبت به گذشته صورت واقعی‌تری پیدا کرده است. این شبیه‌سازی‌ها از سه بخش اصلی تشکیل شده است. دو بخش شبیه‌سازی‌شده‌ی خاکی که نشان‌دهنده‌ی گسل موردنظر و صفحه‌ی آن هستند و بخش دیگری که نمایان‌گر لوله‌ی فولادی است (شکل ۱). پس از ترسیم مدل هندسی اولیه و مش‌بندی متناسب با رفتار گسل با فرض استفاده از مش‌بندی ریزتر در مکان‌هایی با تمرکز تنش بیشتر، المان‌ها به مدل اختصاص داده شده‌اند. خاک شبیه‌سازی‌شده با استفاده از المان‌های صلب (حجمی) و لوله‌ی فولادی با توجه به ماهیت و رفتار آن با المان‌هایی موسوم به المان‌های پوسته‌یی مدل شده است. این المان‌ها قابلیت این را دارند که مصالح و هندسه‌ی غیرخطی به آن‌ها اختصاص داده شود و تحت انواع تحلیل‌های تعریف‌شده در نرم‌افزار قرار گیرند.

پس از مدل‌سازی و تخصیص المان‌های موردنظر باید برای هرکدام از المان‌ها، رفتاری (معیار گسیختگی) متناسب با آن تعریف کرد. برای فولاد مصرفی در لوله‌ها از یک منحنی تنش ـکرنش سه خطی کامل بهره گرفته شده است. این مدل از سطح تسلیم فون میسز[1] و قانون جریان همراه برای عملکرد خود استفاده می‌کند و برای تسلیم اجسام ایزوتروپ و انعطاف‌پذیر به‌کار برده می‌شود.[8] در بیشتر مدل‌ها از فولاد نوع X-۶۵ (استخراج‌شده از آئین‌نامه‌ی API)، استفاده شده است.

مدل رفتاری دراکر ـپراگر نیز به المان‌های صلب که نمایان‌گر خاک اطراف لوله در محیطی نیمه بی‌نهایت هستند، اختصاص داده شده است. این مدل، تقریبی از مدل موهر ـکولمب است و رفتاری کشسان خمیری دارد، بدین معنا که ضمن بارگذاری و باربرداری‌های پی در پی حد تسلیم آن‌ها افزایش یا کاهش می‌یابد. در این مدل رفتاری نیز تئوری قانون جریان همراه برای مصالح ایزوتروپ به‌کار برده شده است. البته براساس فرضیه‌های ارائه‌شده با نرم‌افزار، این مدل رفتاری سه سطح تسلیم خطی، هیپربولیک و نمایی عمومی دارد که برای مصالح دانه‌یی به‌کار برده می‌شود و تفاوت اصلی آن‌ها در شکل تسلیم آن‌هاست. در این مطالعه، از سطح تسلیم خطی مدل رفتاری دراکر ـ پراگر استفاده شده است.

بار اصلی اعمال‌شده به مدل با توجه به ماهیت استاتیکی‌بودن حرکات بزرگ



شکل ۱. نمایی از مدل گسل امتداد لغز شکل راست و نمایی از مدل گسل نرمال شکل چپ.

زمین (گسلش) به‌صورت یک تغییرمکان استاتیکی براساس ابعاد مدل و طول مهاری لوله تعیین شده است. وزن لوله و خاک با واردکردن جرم مخصوص آن‌ها به‌صورت خودکار محاسبه و اعمال شده است.

برای ایجاد پایداری در مدل با استفاده از تعریف اجزای لبه، تمام درجات آزادی قسمت تحتانی خاک در حالت اولیه بسته و در تحلیل استاتیکی یکی از درجات آزادی انتقالی باز و مقدار جابجایی موردنظر اعمال شده است. بنابراین بخش موردنظر مدل به‌صورت صلب جابجا و تحریک موردنظر اعمال شده است. با توجه به استاتیکی‌بودن تحلیل نیازی به اعمال اجزای لبه برای المان‌های اطراف مدل وجود ندارد، چون تأثیری بر پاسخ خطوط لوله نمی‌گذارد.[9]

۳. اندرکنش خاک ـلوله

در معدود مطالعات گذشته برای تحلیل خطوط لوله، آن‌ها را به‌صورت دو بعدی مدل می‌کردند، و در مدل‌سازی‌های با درنظرگرفتن انحنای ثابت و یکنواخت در لوله‌ی تغییرشکل‌یافته و تعیین نیروی اصطکاک بین خاک و لوله با استفاده از روش سعی و خطا در طول لوله و اعمال آن، پاسخ لوله به جابجایی و پارامترهای مؤثر را بررسی می‌کردند. آن‌ها هیچ‌گونه نیروهای اندرکنشی را به مدل اعمال نمی‌کردند و نتایج را دست‌بالا و با درصدی از خطا به‌دست می‌آوردند. در برخی از مطالعات اخیر نیز که البته تعداد آن‌ها بسیار اندک است، از شبیه‌سازی سه بعدی استفاده شده است. در این مطالعات نیروهای اندرکنشی در اطراف لوله در سه جهت محوری، افقی، و قائم به‌وسیله‌ی فنرهایی با خاصیت رفتار غیرخطی و سختی‌هایی مطابق مشخصات خاک موردنظر اعمال شده است. در این مدل‌ها برای درنظرگرفتن نیروهای اندرکنشی با محاسبه‌ی طول مهاری ـطولی که در آن لوله در طرفین گسل با خاک در تماس است و اندرکنش میان آن‌ها برقرار است ـنیروهای اصطکاکی معادل نیروهای اندرکنشی اعمال می‌شود و نتایج با این فرضیات مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش نیز به‌علت اینکه تأثیر خاک بر لوله به‌صورت ساده‌سازی‌شده و با فنر اعمال می‌شود، باید احتمال بروز خطا در پاسخ لوله به جابجایی را مد نظر داشت.

در این مطالعه با توجه به قابلیت و توانایی‌های نرم‌افزار به‌کار برده‌شده می‌توان گفت که در شبیه‌سازی اندرکنش میان خاک و لوله نیازی به قراردادن فنر و ساده‌سازی وجود ندارد. به‌طوری‌که پس از مدل‌سازی، سطوحی که توانایی اعمال تماس میان آن‌ها وجود دارد، شناخته و پس از تعیین ماهیت اندرکنش میان آن‌ها، نوع تماس مناسب اعمال خواهد شد. دو روش برای مدل‌کردن تماس میان دو جسم وجود دارد:

۱. استفاده از المان‌های تماسی بین سطوحی که به‌صورت بالقوه اندرکنش میان آن‌ها وجود دارد. مثلاً اگر دو جسم یا دو بخش از یک جسم قابلیت اندرکنش را داشته باشند، باید در محل تماس دو جسم المان‌های تماسی را با خواص و عملکرد مناسب برای یک تحلیل و نوع خروجی درخواستی تعریف کرد. البته قابل ذکر است که این توانایی وجود دارد که بتوان این المان‌ها را در مدل‌های دو بعدی یا سه بعدی به‌کار برد.

۲. استفاده از جفت‌های تماسی است. این روش دقت و وسعت استفاده‌ی بیشتری نسبت به روش قبلی دارد. به‌طوری که در مرحله‌ی اول بخش‌هایی که قابلیت تماس میان آن‌ها وجود دارد، شناخته می‌شوند و برای هرکدام به‌صورت جداگانه یک سطح تعریف می‌شود. منظور از این سطح، بخش‌هایی از دو جسم است که با هم در تماس هستند، به‌طوری که ممکن است این سطوح به هر شکل هندسی ایجاد شوند. این نوع اندرکنش را تماس سطح به سطح می‌گویند.

در این مطالعه با توجه به المان‌های پوسته‌یی لوله و المان‌های صلب (حجمی) خاک مدل‌شده، دو سطح برای اعمال اندرکنش وجود دارد. یکی سطح رویه‌ی لوله و دیگری سطح داخلی خاک که لوله داخل آن قرار دارد. زمانی‌که این سطوح تعریف شوند، خواص موردنظر با توجه به گزینه‌های موجود در نرم‌افزار اعمال می‌شود. در این حالت تماس فشاری مستقیم (نرمال) همراه با تماس اصطکاکی در یک زمان تعریف شده است. ضریب اصطکاک میان لوله و خاک برای تماس اصطکاکی براساس تخمین اصطکاک میان خاک و فولاد ۰٫۱۵ تعریف شده است. علاوه بر آن حالت تماس، فشاری مستقیم (نرمال) تعریف می‌شود؛ به‌طوری که با توجه به ماهیت تحرک لوله و خاک و قبل از زمان جابجایی گسل، هیچ‌گونه تماسی میان خاک و لوله برقرار نیست. نکته‌ی قابل تأمل دیگر اینکه در زمان جابجایی و ایجاد اندرکنش با توجه به خاصیت خاک، تماس کششی میان خاک و لوله وجود ندارد. بنابراین، تماس فشاری مستقیم با خاصیت توانایی جدایش در زمان عدم اتصال میان خاک و لوله استفاده می‌شود.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، اندرکنشی میان دو قسمت خاک برای شبیه‌سازی گسل موردنظر وجود دارد که باید تماس مناسب برای این شرایط نیز تعریف شود. علت استفاده از المان‌های تماسی بررسی پارامترها و اعمال آن‌ها به مدل است. بنابراین مانند مرحله‌ی قبل، محل اتصال دو قسمت خاکی شناسایی و سطوحی برای آن‌ها تعریف می‌شود. پس از تعریف سطوح باید خاصیت مناسب اعمال شود، به‌طوری که با توجه به ماهیت اصطکاکی و فشاری دو قسمت خاک، ضریب اصطکاک ۲۰٫۷ و تماس سخت نرمال و درنظرگرفتن اینکه جدایشی میان دو قسمت خاک وجود ندارد، تعریف می‌شود. قابل ذکر است که با توجه به واقعیت تحرک گسل بدین صورت که تا رسیدن به یک تنش برشی بحرانی گسیختگی و حرکت گسل رخ نمی‌دهد، می‌توان یک تنش بحرانی تعریف کرد که تا قبل از رسیدن به آن لغزش آغاز نشود.

در این مرحله شبیه‌سازی اندرکنش میان خاک و لوله و دو بخش خاکی نشان‌دهنده‌ی گسل که تقریب مناسبی از رفتار واقعی آن‌هاست، پایان می‌پذیرد. با توجه به اینکه در این شبیه‌سازی، پاسخ لوله به حرکت گسل‌ها با دقت بیشتر بررسی و نتایج تأثیر پارامترهای مختلف بر لوله با تقریب مناسب‌تری استخراج شده است، لذا شبیه‌سازی صورت‌گرفته با این نرم‌افزار برتری محسوسی نسبت به روش‌های اشاره‌شده در مطالعات قبلی دارد.

۴. تحلیل و بررسی پارامترها

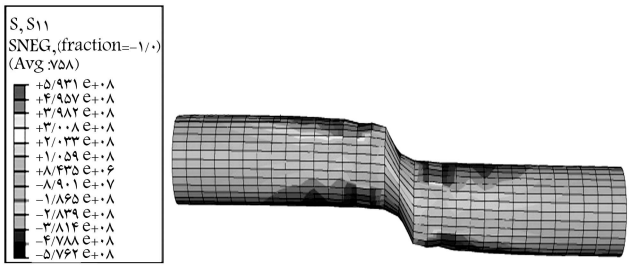
حال پس از یک شبیه‌سازی مناسب باید عوامل مؤثر بر پاسخ لوله بررسی شود. این عوامل که به‌طور قابل ملاحظه‌یی بر عملکرد خط لوله در برابر حرکات گسل مؤثرند، عبارت‌اند از: زاویه‌ی تقاطع محور لوله با صفحه‌ی گسل، قطر لوله، ضخامت لوله، عمق دفن لوله، طول مهاری لوله و نوع مصالح مصرفی.

با توجه به این مطلب که مقدار جرم لوله در مقابل سختی آن ناچیز است، می‌توان گفت نیروهای اینرسی به‌وجودآمده توسط جرم لوله در خط لوله در مقایسه با نیرویی نظیر سختی سیستم لوله ـ خاک ناچیز است، لذا دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم بسیار کوچک خواهد بود. از آنجا که دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم در مقایسه با زمان اعمال جابجایی‌های ناشی از فعالیت گسل کوچک است، استفاده از تحلیل استاتیکی به‌منظور بررسی رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات بزرگ گسل منطقی خواهد بود. در تحقیقاتی که تاکنون صورت پذیرفته است، پاسخ دینامیکی خط لوله در مقایسه با تغییرشکل ناشی از گسل، کوچک به‌شمار آمده است. با توجه به نکته‌ی مطرح‌شده، در این تحقیق نیز فرض می‌شود که تحلیل استاتیکی غیرخطی توانایی ارائه‌ی نتایج مناسب و رضایت‌بخش را داراست. به‌عبارت دیگر نقش گسلش و حرکات بزرگ زمین بر خطوط لوله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

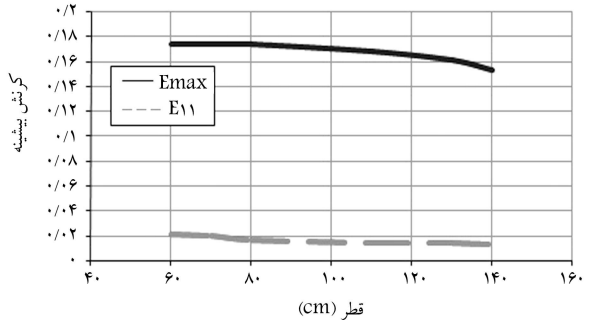
به‌طورکلی خط لوله در اثر حرکت گسل، بسته به نوع گسل و نیز زاویه‌ی تقاطع لوله با آن تحت تأثیر تنش‌های فشاری و کششی قرار می‌گیرد. گسل‌های امتداد لغز و نرمال عموماً باعث ایجاد تنش‌های کششی در خطوط لوله می‌شوند، در حالی‌که گسل‌های معکوس باعث ایجاد تنش‌های فشاری در جداره‌ی لوله و کمانش موضعی در آن‌ها می‌شوند. در این مطالعه تأثیر پارامترهای اشاره‌شده بر پاسخ لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل‌های امتداد لغز و نرمال حساسیت‌سنجی شده است (شکل‌های ۱و۲).

۱.۴. قطر لوله

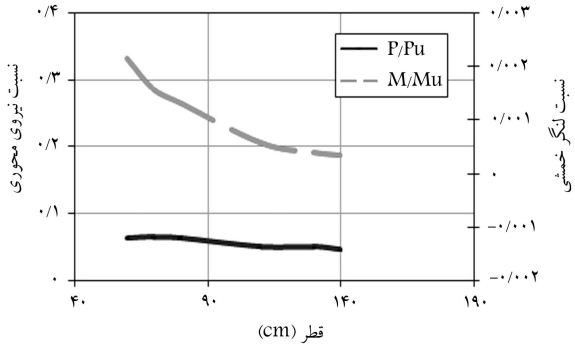
همان‌طور که نتایج استخراج‌شده مربوط به جابجایی گسل امتداد لغز نشان می‌دهد (شکل ۳)، کرنش محوری تغییرات بسیار ناچیزی دارد؛ ولی در کرنش اصلی مقداری کاهش دیده می‌شود. دلیل این کاهش، تأثیر کاهنده‌ی افزایش سختی خمشی بر



شکل ۲. نمایی از لوله‌ی تغییرشکل‌یافته در اثر تنش محوری.

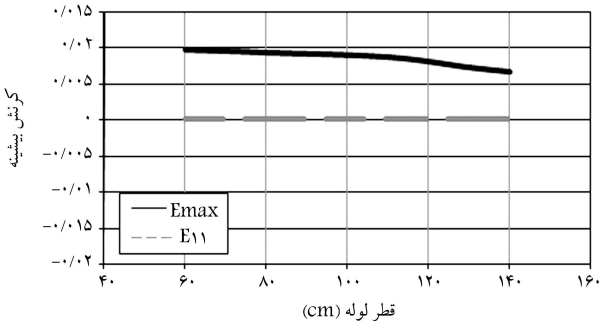


الف) کرنش؛

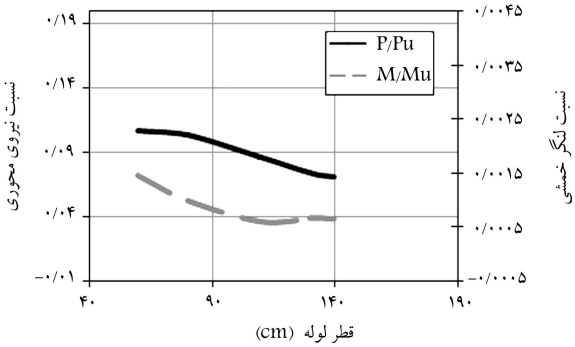


ب) نیروی محوری و لنگر خمشی.

شکل ۳. بررسی تأثیر قطرهای مختلف در گسل امتداد لغز.



الف) کرنش؛



ب) نیروی محوری و لنگر خمشی.

شکل ۴. بررسی تأثیر قطرهای مختلف در گسل نرمال.

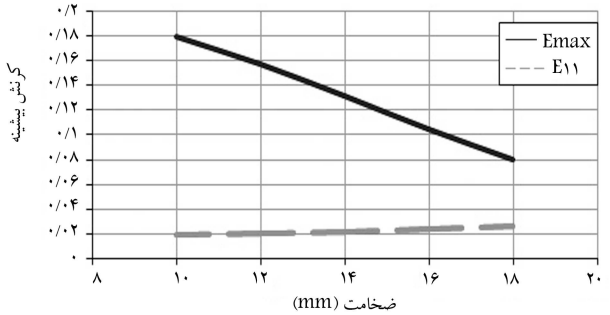
نیروی اندرکنشی میان خاک و لوله است که باعث افزایش ناچیزی در ظرفیت پاسخ لوله شده است. این تحلیل را می‌توان با توجه به تشابه تقریبی در نتایج به‌دست‌آمده از پاسخ لوله به تحریکات گسل نرمال نیز ارائه کرد (شکل ۴).

قابل ذکر است که در مدل‌سازی‌های انجام‌شده[۲و۳] اثر قطر بر پاسخ لوله به‌علت صرف‌نظرکردن از سختی خمشی در مدل‌سازی بسیار ناچیز برآورد شده است، و مقاومت لوله متناسب با قطر آن به‌دست آمده است.

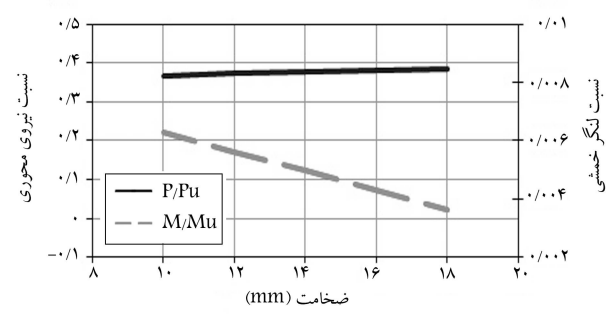
۲.۴. ضخامت لوله

افزایش ضخامت لوله در تقاطع گسل امتداد لغز باعث کاهش چشمگیری در مقدار کرنش اصلی و افزایش بسیار ناچیزی در مقدار کرنش محوری شده است. این نوع پاسخ لوله ناشی از اثر کاهندگی افزایش سختی لوله به واسطه‌ی افزایش ضخامت بر نیروهای اندرکنشی میان خاک و لوله است (شکل ۵). با توجه به نتایج نشان داده‌شده در این شکل، منظور از افزایش سختی حالت خمشی آن است که نتیجه‌ی آن افزایش ظرفیت پاسخ لوله در اثر افزایش ضخامت است. همچنین قابل ذکر است که از اثرات نیروهای محوری لوله به‌علت عدم تأثیر بر کرنش اصلی صرف‌نظر شده است.

رفتار گسل نرمال نیز در اثر افزایش ضخامت لوله همانند رفتار گسل امتداد لغز است، به‌طوری که بر اثر این افزایش در ضخامت لوله، کرنش اصلی کاهش و کرنش محوری به مقدار ناچیزی افزایش داشته است. قابل ذکر است که مقادیر این کاهش و افزایش خیلی کمتر از مقادیر کاهش و افزایش کرنش‌ها در گسل امتداد لغز است، به‌طوری که شیب نمودارها در بازه‌ی عددی کوچک‌تری و با سرعت کمتری تغییر یافته است (شکل ۶). این شکل همچنان نشان می‌دهد که شیب کاهش کرنش اصلی در ضخامت‌های کوچک‌تر بیشتر است و با توجه به تغییرات کرنش و نیروی محوری می‌توان از اثرات آن بر پاسخ لوله صرف‌نظر کرد.

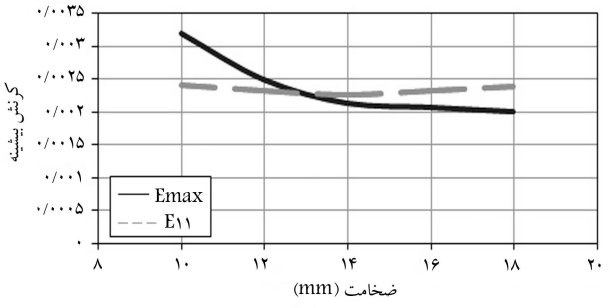


الف) کرنش؛

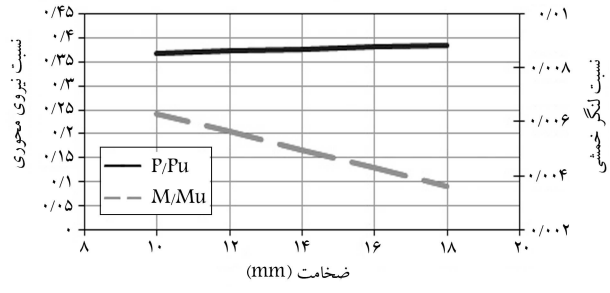


ب) نیروی محوری و لنگر خمشی.

شکل ۵. بررسی تأثیر ضخامت‌های مختلف در گسل امتداد لغز.



الف) کرنش؛



ب) نیروی محوری و لنگر خمشی.

شکل ۶. بررسی تأثیر ضخامت‌های مختلف در گسل نرمال.

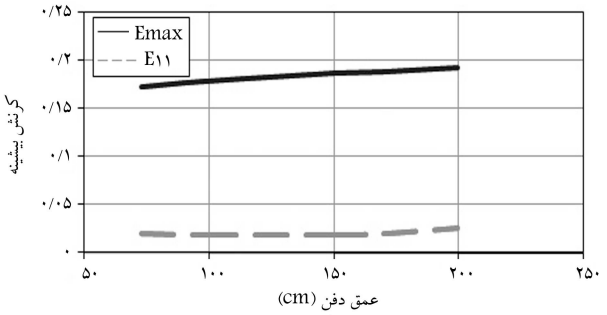
۳.۴. عمق دفن

تغییرات پاسخ لوله‌های مدفون به حرکات سه بعدی گسل‌های امتداد لغز و نرمال در اثر افزایش عمق دفن لوله نشان می‌دهد که افزایش عمق دفن موجب افزایش نیروی محوری و خمشی و همچنین کرنش‌های محوری و اصلی در هر دو نوع گسل می‌شود (شکل‌های ۷ و ۸). همچنین با توجه به نتایج می‌توان گفت، هر چه عمق

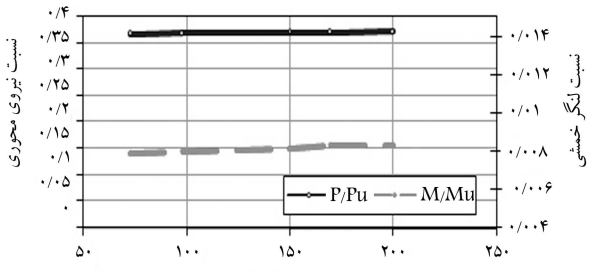
دفن لوله بیشتر می‌شود، تأثیر نیروی اندرکنشی میان خاک و لوله نیز با شیب‌های مختلف و در بازه‌های متفاوت در هرکدام از گسل‌ها بر سختی لوله بیشتر می‌شود و در نتیجه ظرفیت پاسخ لوله را کاهش خواهد داد.

۴.۴. زاویه‌ی تقاطع لوله با صفحه‌ی گسل

افزایش زاویه‌ی تقاطع لوله تا مرز ۹۰ درجه درگسل امتداد لغز نشان می‌دهد که هر چه زاویه‌ی تقاطع به قائمه نزدیک‌تر می‌شود، نسبت لنگر محوری و کرنش محوری در

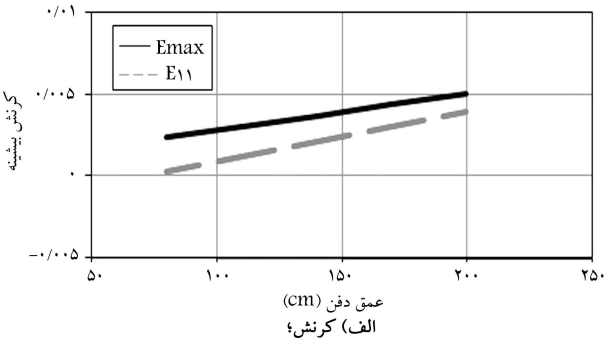


الف) کرنش؛

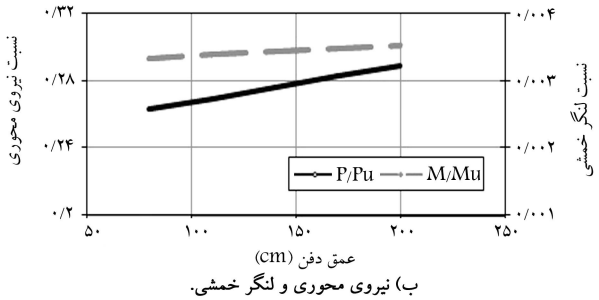


ب) نیروی محوری و لنگر خمشی.

شکل ۷. بررسی تأثیر عمق‌های دفن مختلف درگسل امتداد لغز.

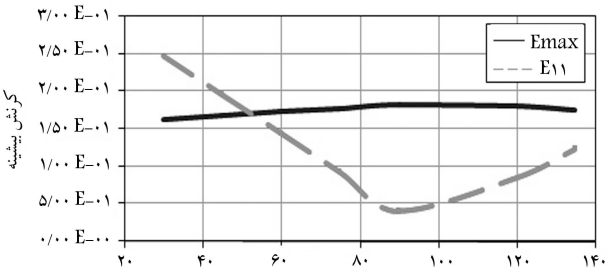


الف) کرنش؛

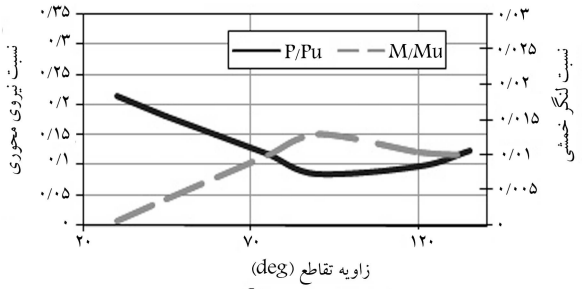


ب) نیروی محوری و لنگر خمشی.

شکل ۸. بررسی عمق‌های دفن مختلف درگسل نرمال.



الف) کرنش؛



ب) نیروی محوری و لنگر خمشی.

شکل ۹. بررسی تأثیر زاویه‌های مختلف تقاطع درگسل امتداد لغز.

لوله کاهش می‌یابد؛ ولی نسبت نیروی خمشی افزایش یافته و درکرنش اصلی نیز تغییر محسوسی دیده نمی‌شود (شکل ۹). این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش زاویه‌ی تقاطع تا مرز ۹۰ درجه نیروی اندرکنشی میان خاک و لوله تأثیری بر کرنش اصلی نداشته است و می‌توان نتیجه گرفت که کرنش اصلی مستقل از تغییرات زاویه‌ی تقاطع لوله با صفحه‌ی گسل است. در مقابل مشاهده می‌شود که تأثیر کاهندگی سختی محوری بر نیروهای اندرکنشی با افزایش زاویه تا مرز ۹۰ درجه بیشتر می‌شود و تا پایان مرحله‌ی ظرفیت پاسخ لوله افزایش یافته است.

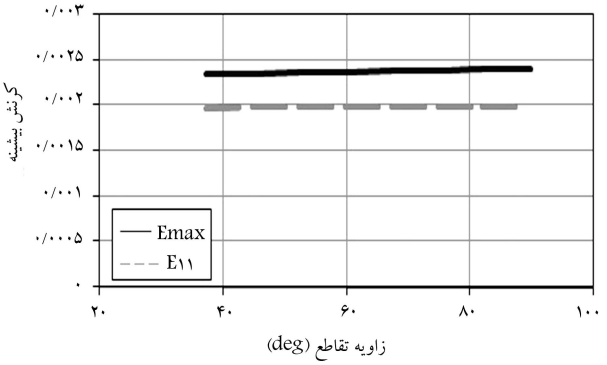
رفتاری مخالف آنچه در فوق ذکر شد، می‌توان برای بررسی تأثیر زاویه‌ی تقاطع لوله در بازه‌ی ۹۰ تا ۱۳۵ درجه برگسل امتداد لغز بیان داشت (شکل ۹). بدین‌معنی که با افزایش زاویه‌ی تقاطع لوله با صفحه‌ی گسل از ۹۰ درجه تا ۱۳۵ درجه به‌علت تأثیر افزاینده‌ی نیروی اندرکنشی بر نیرو و کرنش محوری ظرفیت پاسخ لوله کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج مربوط به تغییرات زاویه‌ی تقاطع درگسل نرمال می‌توان این‌گونه بیان کرد که با تغییر زاویه‌ی تقاطع لوله با صفحه‌ی گسل کرنش‌های اصلی و محوری تغییر چندانی نداشته‌اند و یا به بیان دیگر، تغییر زاویه‌ی لوله در این نوع گسل مستقل از تغییرات کرنش است. همچنین دیده می‌شود که نسبت نیروی خمشی نیز با افزایش زاویه ثابت مانده است. پس با توجه به روند کاهشی نسبت نیروی محوری می‌توان گفت با افزایش زاویه‌ی تقاطع درگسل نرمال نیروی کششی ایجادشده در لوله کاهش می‌یابد (شکل ۱۰).

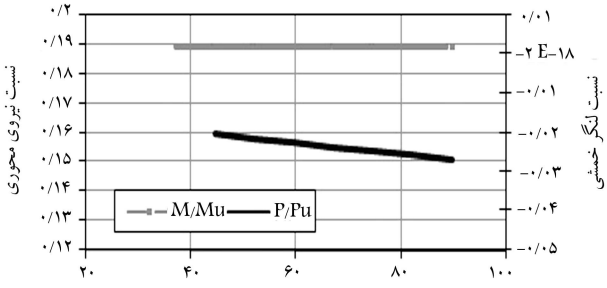
۵.۴. تأثیر جابجایی گسل‌ها بر پاسخ لوله با توجه به تغییر خصوصیات مصالح

تغییرات کرنش‌های بیشینه و محوری سه نوع متداول مصالح استفاده‌شده در لوله‌ها با نام‌های X۷۰، X۶۵، API-5L X۶۰ را در مقابل افزایش جابجایی گسل‌های امتداد لغز و نرمال در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، در دو گسل موردنظر با افزایش جابجایی،

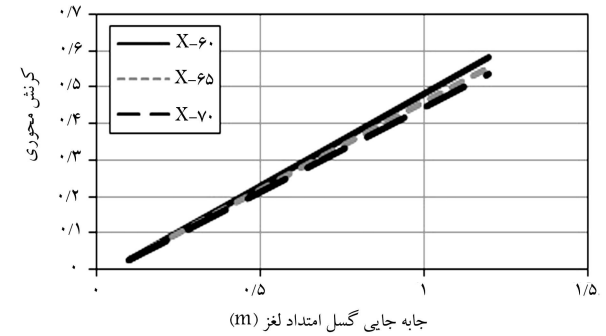


الف) کرنش؛

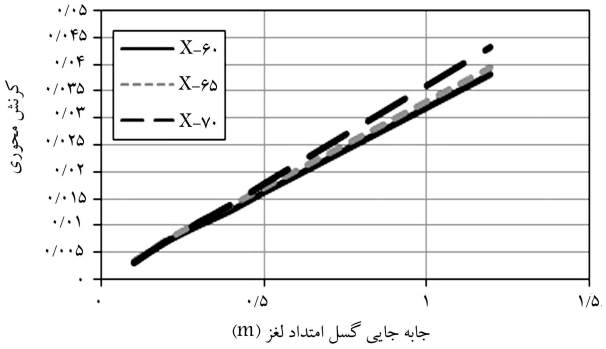


ب) نیروی محوری و لنگر خمشی.

شکل ۱۰. بررسی تأثیر زاویه‌های مختلف تقاطع درگسل نرمال.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱. تغییرات درکرنش‌های اصلی و محوری مصالح لوله نسبت به جابجایی گسل امتداد لغز.

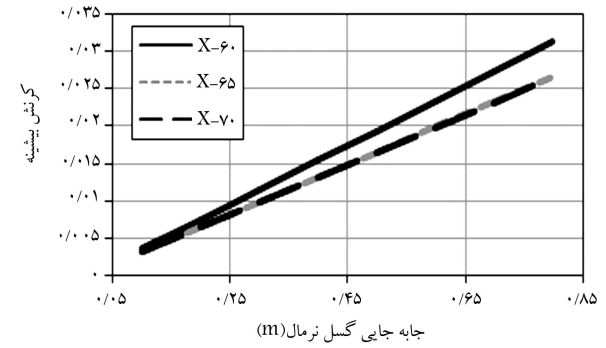
مقادیرکرنش بیشینه وکرنش محوری با شیب یکسانی در هر یک ازگسل‌ها افزایش پیدا می‌کند. تأثیر جابجایی گسل امتداد لغز بر نوع مصالح مصرفی لوله به این صورت است که با افزایش جابجایی گسل، هرچه مقاومت مصالح مصرفی در لوله بیشتر باشد، افزایش کرنش محوری در آن بیشتر است؛ ولی این روند درکرنش بیشینه به دلیل تأثیر بیشتر سختی خمشی نسبت به سختی محوری لوله به‌صورت معکوس است. همین تحلیل را نیز می‌توان برای جابجایی گسل نرمال بیان کرد، ولی با این تفاوت که محدوده‌ی تغییرات کرنش‌های بیشینه و محوری بر اثر جابجایی گسل امتداد لغز خیلی بیشتر از این تغییرات درگسل نرمال است.

۶.۴. طول مهاری

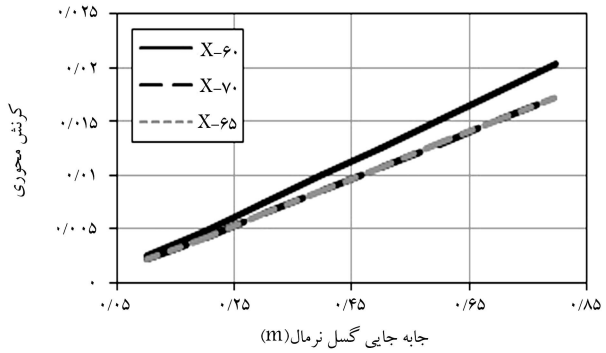
یکی از عوامل مؤثر بر پاسخ لوله به حرکات گسل، طول مهاری لوله در طرفین گسل است. عملاً این طول می‌تواند با موقعیت خم‌ها، سه‌راهی‌ها و پی‌هایی که به‌صورت گیردار به خط لوله متصل شده است، تحت تأثیر قرار گیرد.

نتایج مربوط به تغییرات درصد طول مهاری نسبت به قطر نشان می‌دهد که با افزایش قطر لوله درصد طول مهارشده در هر دو نوع گسل کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه اثرات کاهندگی سختی خمشی و محوری در تغییرات قطر تأثیر چندانی ندارند، می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش قطر لوله سطح شرکت‌کننده در اندرکنش و تماس خاک و لوله بیشتر می‌شود و در نتیجه طول مهاری لوله کاهش می‌یابد (شکل ۱۳).

روند تغییرات ضخامت جداره‌ی لوله نسبت به درصد طول مهاری نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت جداره‌ی لوله و غلبه‌ی نیروی مقاوم بر نیروی اندرکنش به‌علت افزایش سختی لوله طول مهاری افزایش می‌یابد که می‌تواند باعث افزایش ظرفیت

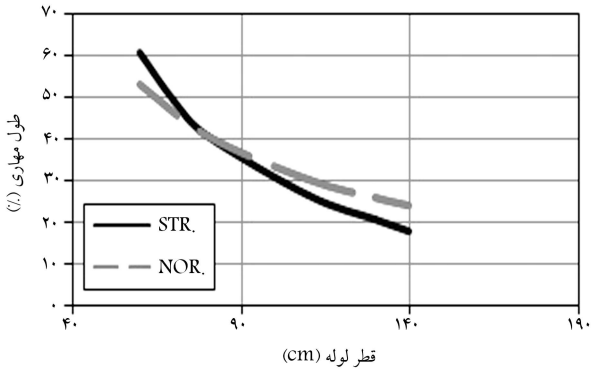


(الف)

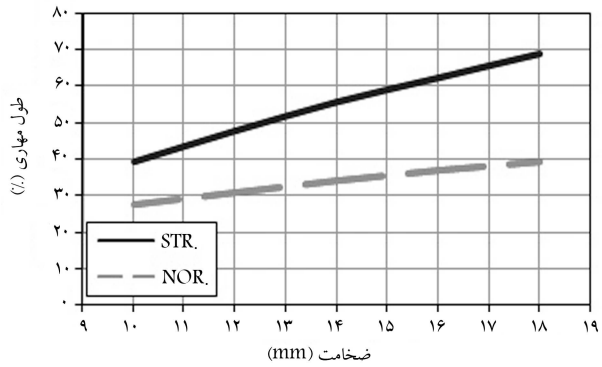


(ب)

شکل ۱۲. تغییرات درکرنش‌های اصلی و محوری مصالح لوله نسبت به جابجایی گسل نرمال.



شکل ۱۳. تغییرات درصد طول مهارشده نسبت به قطر لوله.



شکل ۱۴. تغییرات درصد طول مهارشده نسبت به ضخامت لوله.

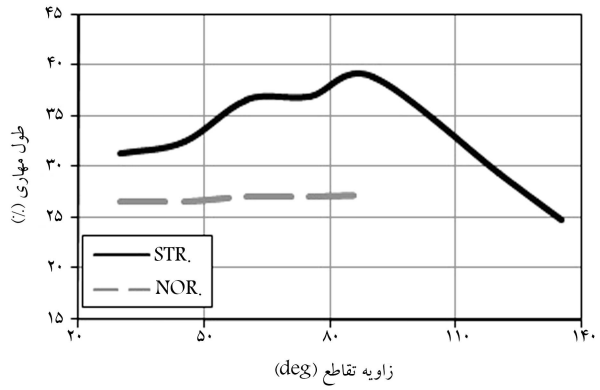
پاسخ لوله در طی افزایش ضخامت جداره شود (شکل ۱۴). با توجه به تغییرات زاویه‌ی تقاطع لوله با صفحه‌ی گسل نسبت به درصد طول مهاری، می‌توان گفت افزایش زاویه‌ی تقاطع تغییرات چندانی بر درصد طول مهارشده در گسل‌های نرمال ایجاد نمی‌کند. علت آن نیز تعادل میان نیروی مقاوم لوله با نیروهای اندرکنشی است که تأثیر محسوسی بر مقدار طول مهاری نمی‌گذارد. در گسل امتداد لغز این تغییرات بسیار چشم‌گیر است، به‌طوری که با افزایش زاویه‌ی تقاطع تا حدود ۹۰ درجه درصد طول مهاری افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علت این نوسان نیز به چگونگی تأثیر متقابل نیروهای مقاوم ایجادشده در لوله بستگی دارد که ناشی از تغییر زاویه‌ی لوله و نحوه‌ی اعمال آن‌ها بر نیروهای اندرکنشی میان خاک و لوله است (شکل ۱۵).

۷.۴. مقایسه‌ی نتایج

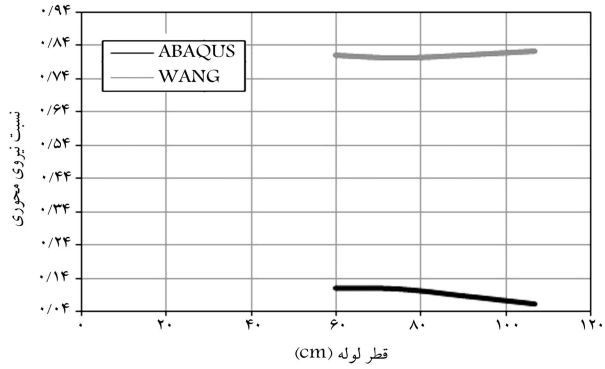
برای مقایسه‌ی نتایج باید مدل‌هایی ساخته شده باشد که با مدل‌های درنظرگرفته‌شده‌ی پژوهشگران این رشته نزدیک‌تر باشد. به همین علت و با توجه به نتایج موجود در مقالات فقط امکان مقایسه‌ی سه پارامتر قطر، عمق دفن و زاویه‌ی تقاطع لوله با صفحه‌ی گسل در مدل نرم‌افزاری با مدل‌های مورد مطالعه[۵و۶] وجود داشت.

در مدل اول تغییرات نیروی محوری و کرنش بیشینه با نتایج مشابه این پژوهشگران مورد مقایسه قرار گرفت. شایان ذکر است که علت اصلی تفاوت موجود در مدل نرم‌افزاری و مدل‌های درنظرگرفته‌شده توسط دانشمندان بیشتر به درنظرگرفتن میان خاک و لوله برمی‌گردد، به‌طوری که آن‌ها برای ساده‌سازی نیروی اصطکاکی جایگزین نیروی اندرکنشی کرده‌اند و یا از فنر با سختی خاک استفاده کرده‌اند. پس اگر تفاوتی در مقایسه‌ی نتایج نرم‌افزار و مدل‌های مذکور مشاهده می‌شود، به‌علت دقت در مدل‌سازی و نزدیکی مدل نرم‌افزاری به واقعیت است.

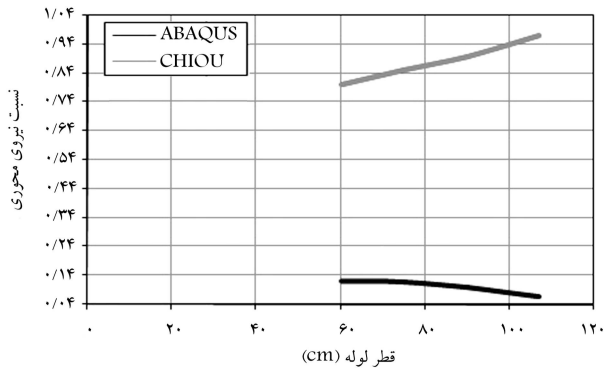
نیروی محوری در مدل نرم‌افزار روندی نزولی دارد ولی در مدل‌های ذکرشده[۵و۶] روندی صعودی دارد که البته مقادیر آن‌ها ناچیز است و فقط اختلاف در بازه‌ی مقادیر نیرو دیده می‌شود که علت آن نیز مدل‌سازی واقعی‌تر است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). همین تحلیل را در مورد کرنش بیشینه نیز می‌توان به‌کار برد، با این تفاوت که بازه‌ی مقادیر آن‌ها تقریباً یکسان است.



شکل ۱۵. تغییرات درصد طول مهارشده نسبت به زاویه‌ی تقاطع لوله با صفحه‌ی گسل.



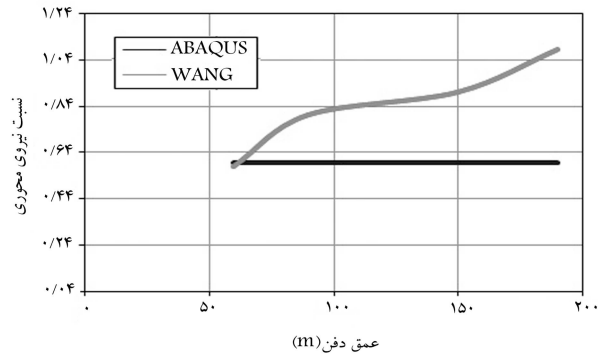
شکل ۱۶. مقایسه‌ی بین نیروی محوری مدل نرم‌افزاری و مدل وانگ[۵] با تغییرات قطر.



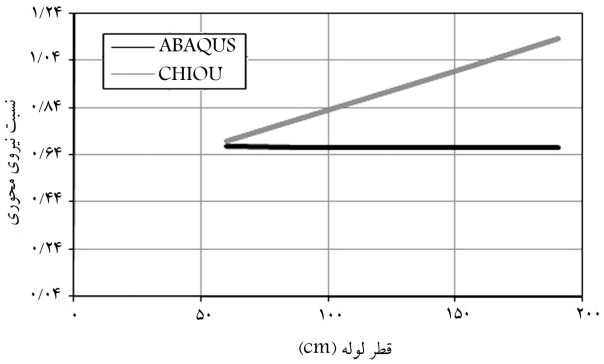
شکل ۱۷. مقایسه‌ی بین نیروی محوری مدل نرم‌افزاری و مدل چیو[۶] با تغییرات قطر.

برای مقایسه‌ی پارامتر عمق دفن نیز همانند روش‌های ذکرشده، مدل‌سازی‌های یکسان انجام گرفته است. موضوعی که در بیشتر شکل‌ها قابل بیان است، ثابت‌بودن تغییرات نیروی محوری در مقابل تغییرات عمق دفن است. به‌طوری که می‌توان گفت در مدل نرم‌افزاری برخلاف دو مدل دیگر با این شرایط نیروی محوری مستقل از تغییرات عمق دفن است (شکل‌های ۱۸ و ۱۹). کرنش بیشینه نیز روندی مشابه با روند مدل چیو[۶] دارد، ولی دارای شیب متفاوتی است (شکل ۲۰).

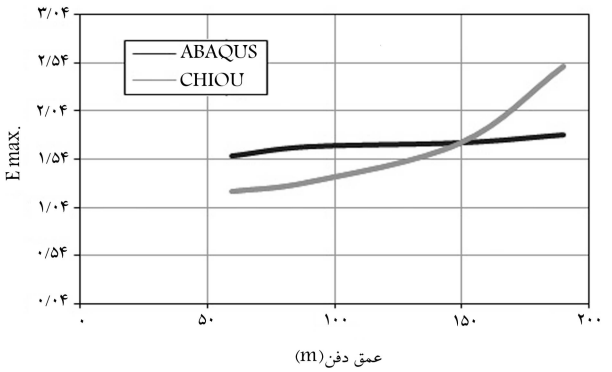
در انتها نیز پارامتر زاویه‌ی تقاطع لوله با محور گسل مقایسه شده است. در بررسی نیروهای محوری مدل نرم‌افزار و مدل‌های بیان‌شده[۵و۶] می‌توان گفت که در



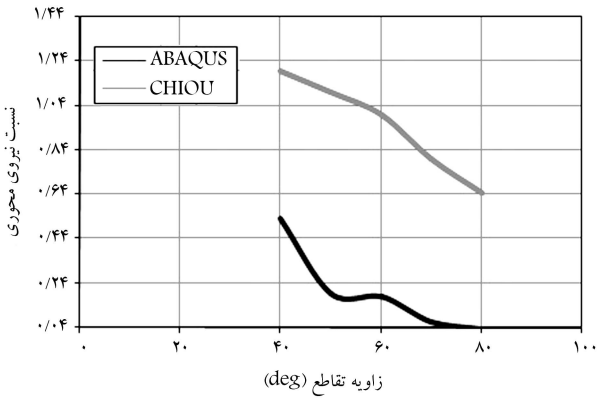
شکل ۱۸. مقایسه‌ی بین نیروی محوری مد ل نرم‌افزاری و مدل وانگ[۵] با تغییرات عمق دفن.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی بین نیروی محوری مدل نرم‌افزاری و مدل چیو[۵] با تغییرات عمق دفن.



شکل ۲۰. مقایسه‌ی بین نیروی محوری مدل نرم‌افزاری و مدل وانگ[۵] با تغییرات زاویه‌ی تقاطع.



شکل ۲۱. مقایسه‌ی بین نیروی محوری مدل نرم افزاری و مدل چیو[۵] با تغییرات زاویه‌ی تقاطع.

هر دو کاهش وجود دارد، ولی بازه‌ی مقادیر آن‌ها به دلیل ذکرشده متفاوت است و همچنین این تفاوت در بازه‌ی مقادیر برای دو مدل ذکرشده[۵و۶] هم به مقدار کمی دیده می‌شود که دلیل اصلی آن‌ها را نیز در نحوه‌ی مدل‌سازی باید جستجو کرد (شکل ۲۱). کرنش بیشینه نیز در مدل نرم‌افزاری کاهش نشان می‌دهد که این کاهش با نتایج مدل چیو[۶] تا زاویه‌ی ۶۰ درجه مشترک و بعد از آن کرنش بیشینه در مدل چیو[۶] برخلاف مدل نرم‌افزار افزایش پیدا می‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

- افزایش قطر لوله تا زمانی که مسائل اقتصادی اجازه می‌دهد، مانعی ندارد و باعث افزایش ظرفیت پاسخ لوله در هر دو نوع گسل امتداد لغز و نرمال خواهد شد.
- استفاده از ضخامت جداره بالاتر باعث افزایش سختی لوله و در پی آن افزایش نیروی مقاوم ایجادشده در لوله و ظرفیت پاسخ لوله خواهد شد که براساس نتایج، این افزایش در محدوده‌ی ضخامت‌های کوچک‌تر خیلی چشمگیرتر از محدوده‌ی ضخامت‌های بزرگ‌تر است.
- کاهش عمق دفن باعث افزایش ظرفیت پاسخ لوله خواهد شد، البته این کاهش باید با درنظرگرفتن مسائل دیگری مانند آب و هوا نیز باشد، چرا که عمق دفن لوله را می‌توان تا ارتفاع مشخصی کاهش داد ولی پس از آن مشکلات دیگری مانند یخ‌زدگی و ترکیدگی و... در اثر عدم پوشش مناسب روی لوله ایجاد خواهد شد.
- زاویه‌ی محور لوله با صفحه‌ی گسل هر مقدارکه به زاویه‌ی قائمه نزدیک‌تر باشد باعث می‌شود که نیروهای مقاوم ایجادشده در لوله تأثیر بیشتری بر نیروهای اندرکنشی داشته باشد و متعاقب آن ظرفیت پاسخ لوله افزایش خواهد یافت.
- بهره‌گیری از فولاد با مقاومت متوسط می‌تواند هم تأثیر مثبتی بر پاسخ لوله داشته باشد و هم از نظر اقتصادی مناسب باشد.
- با توجه به نتایج مقایسه‌ی طول مهاری دو گسل نرمال و امتداد لغز می‌توان گفت قطرهای کوچک‌تر، ضخامت‌های بزرگ‌تر و زاویه‌ی نزدیک به قائمه را برای یک طول مهاری مناسب انتخاب کرد.
- مهم‌ترین دلیل اینکه نتایج به‌دست‌آمده ازمطالعه‌ی یانگ[۵] و چیو[۶] محافظه‌کارانه‌تر از نتایج تحلیل نرم‌افزار است، نحوه‌ی مدل‌سازی و فرضیاتی است که مدل‌سازی را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌کند.

پانوشتها

1. Von Mises

۲. این ضرایب براساس تخمینی از نوع فولاد (X-۶۵) و نوعی خاک با سختی متوسط برگرفته از آیین نامه API بصورت ثابت برتمام مدل‌ها اعمال شده تا پارامترهای مختلف بررسی شوند.

منابع (References)

1. Hosseini, M. and Tiv, M. "Guideline for the seismic design of oil and gas pipelines system", *IIEES publications,* Tehran, (Book in Persian) (1997).
2. Zia Tohidi, R., *Study on Effect of Fault Three Dimensional Movement on Buried Pipelines*, PhD Thesis, Tarbiat Modarres University (2004).
3. Newmark, N.M. and Hall, W.J. "Pipeline design to resist large fault displacement", *Proc. of the U.S. National Conf. on Earthquake Engineering,* Oakland, pp. 416-425 (1975).
4. Kennedy, R.P. and Chow, A.W. "Fault movement effects on buried oil pipeline", *Transportation Engineering Journal, ASCE,* **103**(5), pp. 617-633 (1977).
5. Wang, L.R.L. and Yeh, Y.H. "A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal,* **13**(1), pp. 75-96 (Feb. 1985).
6. Chiou, Y.J. and Chi, S.Y. "A study on buried pipeline response to fault movement", *Journal of pressure Vessel Technology, ASCE,* **116**(1), pp.361-378 (1994).
7. Takada, S.; Hassani , N. and Fukuda, K. "A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal,* **30**(8), pp. 1243-1257 (Apr. 2001).
8. Sadrnejad, S.A. "Principles of soil plasticity", *K.N. Toosi University of Technology Publication,* Tehran, Iran (2000).
9. Bolvardi, V., *Study on Seismic Behavior of Buried Steel Pipelines Crossing Active Faults*, MSc Thesis, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology (2008).