بررسی اثر زلزله بر خطوط لوله گاز مدفون

دکتر خسرو برگی

استادیار گروه مهندسی عمران ـ دانشکده فنی ـ دانشگاه تهران

مهندس غلامرضا هروی

کارشناسی ارشد سازه ـ دانشکده فنی ـ دانشگاه تهران

چکیده

در مقاله حاضر رفتار خطوط لوله مدفون گاز تحت اثر پدیده گسلش و امواج ارتعاشی زلزله بطور مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا، رفتار خطوط لوله مدفون تحت اثر حرکت نسبی زمین در محل گسلها به سه روش، نیومارک ـ هال ، کندی و همکاران، ونگ ـ یه مورد تحلیل قرار گرفته و با استفاده از نتایج این تحلیلها ضمن آنکه اثر عوامل مختلف بر رفتار خطوط لوله مدفون بررسی شده، نتایج و توصیه‌های لازم ارائه گردیده است. همچنین تحلیل رفتار خطوط لوله مدفون تحت اثر امواج ارتعاشی زلزله بوسیله مدل تحلیل جرم متمرکز، به روش گام به گام θـ ویلسون انجام گرفته است، و ضمن مشخص شدن عوامل مؤثر بر رفتار خطوط لوله مدفون، نتایج و توصیه‌هایی مبتنی بر روش تحلیلی به کار گرفته شده ارائه گردیده است.

۱ـ مقدمه

خطوط لوله مدفون، به علت خصوصیات سازه‌ای ویژه و همچنین وجود خاک پیرامون آنها، به گونه‌ای متفاوت با سازه‌های معمولی، تحت تأثیر زمین لرزه واقع شده و به آن پاسخ می‌دهند. طول زیاد، جرم ناچیز لوله و جرم زیاد خود خاک و سختی آن ناشی از اندرکنش خاک و بدنه لوله، منشاء این تفاوت رفتار می‌باشند. در بررسی حاضر، رفتار خطوط لوله مدفون تحت اثر جابجایی نسبی زمین در محل گسلها و ارتعاش زمین مورد بررسی قرار می‌گیرد. با فرض یکنواخت بودن خاک پیرامون لوله و همچنین صرفنظر از اثر اتصالات مرسوم در خطوط لوله گاز (اتصالات جوش‌شده)، این بررسی در دو قسمت کاملاً مجزا انجام می‌شود.

در مورد رفتار خطوط لوله مدفون تحت اثر لغزش گسلها، نتایج انجام شده، نشان داده است که سرعت لغزش گسل بر تنشهای ایجاد شده در خطوط لوله تأثیر چندانی ندارد و تنها می‌تواند مقاومت خاکهای چسبنده پیرامون لوله را کمی افزایش دهد، که در این موارد با انتخاب مقادیر بزرگتری برای ضرایب مؤثر در تعیین مقاومت این نوع خاکها، این اثر ملحوظ می‌شود. بنابراین تحلیل رفتار لوله در حالت استاتیکی صورت می‌گیرد، و از پاسخ بسیار ناچیز دینامیکی خط لوله صرفنظر می‌شود. با توجه به اثر نگهدارنده خاک،

تغییر مکان نسبی بین خاک و لوله در محل گسلها، باعث اعمال‌نیرو در جهات محوری و جانبی بر خط لوله می‌شود. این نیروها، تعیین‌کننده رفتار لوله مدفون در گذر از گسلها می‌باشند.

در مورد رفتار خطوط لوله مدفون تحت اثر امواج ارتعاشی زمین‌لرزه، ویژگیهای پاسخ دینامیکی آن معمولاً از عوامل زیر ناشی می‌شود:

الف ـ طول زیاد خطوط لوله در جهت افقی باعث می‌شود، نقاط مختلف خط لوله مدفون تحت اثر حرکات مختلف زمین واقع شوند (علت این امر اختلاف فاز امواجی است که به این نقاط می‌رسند).

ب ـ جرم ناچیز خطوط لوله باعث می‌شود تأثیر اینرسی در رفتار خطوط لوله بسیار کمتر از اثر آن در مورد سازه‌های معمولی باشد.

ج ـ وجود سختی و استهلاک قابل توجه خاک پیرامون لوله، رفتار دینامیکی خط لوله را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با توجه به خصوصیات فوق و همچنین با فرض عدم تأثیر ارتعاشات جانبی و محوری خط لوله بر یکدیگر، رفتار خطوط لوله مدفون در این دو وضعیت ارتعاشی، مستقل از یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از آنجا که ماهیت رفتار خطوط لوله مدفون تحت اثر لغزش گسلها و امواج ارتعاشی زلزله کاملاً متفاوت می‌باشد، اثر هر یک از این عوامل در دو بخش مستقل از یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ـ رفتار خطوط لوله مدفون تحت اثر پدیده گسلش

جابجائی نسبی قسمتهای مجاور یکدیگر در پوسته زمین پدیده گسلش نامیده می‌شود. خط لوله‌ای که گسل را قطع می‌کند، در مقابل این حرکات نسبی مقاومت کرده واز حرکت زمین بطور کامل پیروی نمی‌کند. عدم پیروی کامل لوله از حرکت گسل باعث بوجود آمدن حرکت نسبی بین لوله و خاک اطراف آن شده و نهایتاً همین حرکت نسبی است که باعث وارد آمدن نیرو از طرف خاک بر خط لوله مدفون شده و در نتیجه در دیواره لوله تنشهایی متناسب با این نیروها بوجود می‌آیند. این تنشها که معمولاً بزرگ می‌باشند باعث گسیختگی خط لوله در این ناحیه می‌شوند. گسلها با توجه به جهت حرکت نسبی زمین در طرفین صفحه گسل به چهار گروه تقسیم می‌شوند (شکل ۱).

ـ لغزش جانبی

ـ لغزش عادی

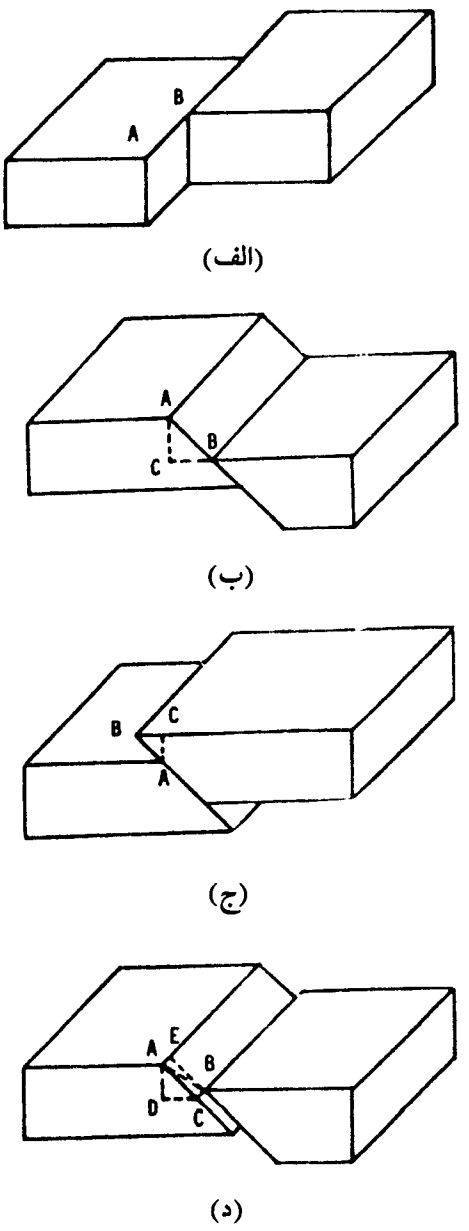
ـ لغزش معکوس

ـ لغزش مایل

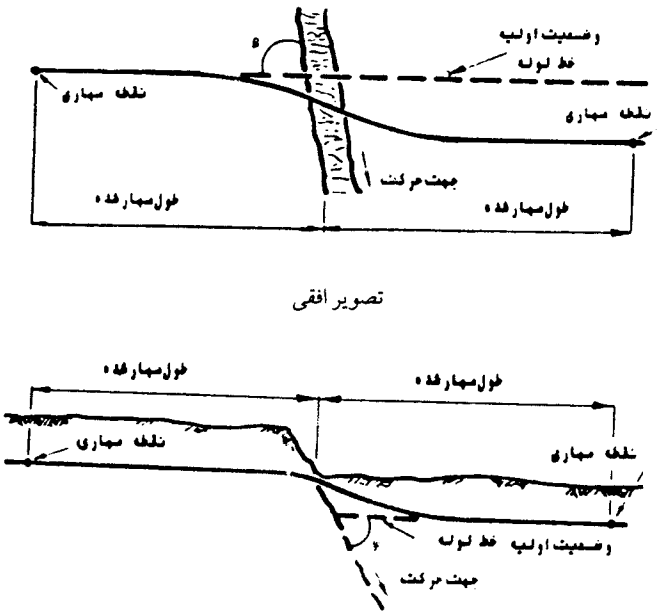
گسل با لغزش جانبی با توجه به زاویه تقاطع خط لوله و گسل (زاویه گذر) موجب ایجاد نیروهای کششی و فشاری در خط لوله می‌گردد. لغزش عادی گسل، مستقل از زاویه گذر، در خط لوله نیروهای کششی ایجاد می‌کند. لغزش معکوس بر خلاف لغزش عادی، خط لوله را تحت فشار قرار داده و بالاخره لغزش مایل که ترکیبی از لغزشهای جانبی و عادی یا معکوس می‌باشد، در دیواره خط لوله تنشهای کششی یا فشاری ایجاد می‌کند. در مورد گسلهای عادی، معکوس و مایل، علاوه بر زاویه گذر لوله (β)، زاویه شیب گسل (Ψ) نیز بر نیروهای وارد بر خط لوله مؤثر می‌باشد. این زوایا در پلان و نما برای حرکت مایل گسل در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

عموماً پاسخ دینامیکی خط لوله مدفون در اثر حرکت گسلها در مقایسه با تغییر شکل ناشی از این پدیده که بطور

استاتیکی بر لوله اعمال می‌گردد ناچیز می‌باشد، بنابراین می‌توان با استفاده از اعمال تغییر شکلهای نسبی به صورت استاتیکی نتایج قابل قبولی بدست آورد، و تنها موردی که باید در نظر گرفت، اثر سرعت حرکت گسل بر روی مقاومت خاکهای چسبنده می‌باشد.



شکل ۱ـ انواع لغزش گسل الف ـ جانبی ب ـ عادی ج ـ معکوس د ـ مایل



شکل ۲ـ تغییر شکل لوله مدفون تحت اثر لغزش جانبی و عادی گسل

۲ـ۱ـ عوامل مؤثر بر رفتار خط لوله

عواملی که تعیین کننده رفتار خطوط لوله مدفون در تقاطع با گسلها می‌باشند عبارتند از :

۲ـ۱ـ۱ـ مقاومت خاک در مقابل تغییر شکل خط لوله (اندرکنش خاک و لوله)

الف ـ مدل تحلیلی اندرکنش سیستم خاک ـ لوله

ب ـ نوع و مشخصات خاک پیرامون خط لوله

ج ـ جهت حرکت نسبی خط لوله نسبت به خاک پیرامون آن

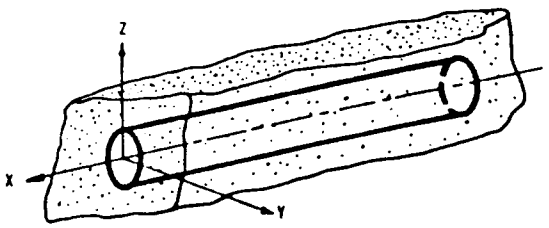
د ـ سطح تماس خط لوله و خاک پیرامونی (قطر خارجی لوله مدفون)

هـ ـ عمق مدفون‌شدگی خط لوله

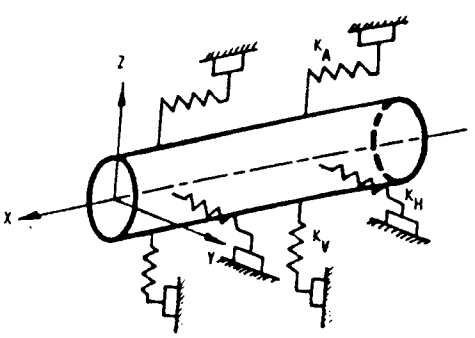
و ـ زاویه اصطکاک بین خاک و بدنه لوله

اندرکنش خاک و لوله بصورت فنرهایی مدل می‌شودکه در جهات محوری (طولی)، جانبی افقی و جانبی قائم در مقابل حرکت لوله مقاومت می‌کنند (شکل ۳). مقدار نیرویی که از طرف خاک بر خط لوله مدفون وارد می‌شود، تابعی غیرخطی از مقدار تغییر مکان نسبی بین خاک و بدنه لوله می‌باشد. مشخصه‌های بارگذاری ـ تغییر مکان مربوط به مدل فنری اندرکنش خاک و لوله بصورت کیفی در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. Z,Y, X جهت حرکت را نشان می‌دهند و Q,P,T نشان دهندهٔ نیروهای وارد بر خط لوله مدفون می‌باشند.

اگر خط لوله مدفون که بصورت تیر مدل شده است، تحت تأثیر تغییر شکلهای نسبی بزرگ (بزرگتر از Z_u, Y_u, X_u)

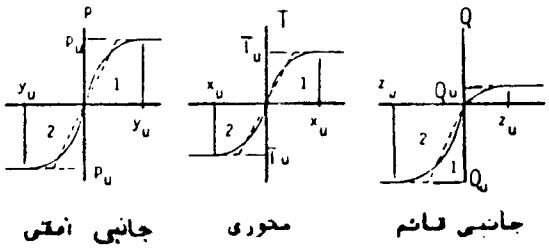


الف ـ شرایط واقعی



ب ـ مدل تحلیلی

شکل ۳ـ اندرکنش خاک و لوله الف ـ شرایط واقعی، ب ـ مدل تحلیلی



شکل ۴ـ مشخصه‌های کیفی مدل فنری اندرکنش خاک و لوله

واقع شود، نیروهایی که از طرف خاک بر آن وارد می‌شوند، مقادیر ثابت Q_u, P_u, T_u می‌باشند، که در تحلیل رفتار خطوط لوله مدفون تحت اثر لغزش گسلها، از همین مقادیر ثابت استفاده می‌شود. علت این امر وجود تغییر شکلهای نسبی بزرگ در مجاورت گسلها می‌باشد.

برای تعیین مقاومت خاک در جهات مختلف از روابط و منحنی‌های ارائه شده در مرجع [۱] استفاده شده است.

۲ـ۱ـ۲ـ جنس و خصوصیات مصالح تشکیل‌دهنده خط لوله مدفون

در بررسی حاضر، خط لوله بصورت تیری مدل می‌شود که در نواحی دور از ناحیه گسل رفتار الاستیک داشته و بر یک بستر الاستیک قرار گرفته است، و در ناحیه گسل با توجه به وضعیت تغییر شکل لوله و میزان حرکت گسل، خصوصیات بستر و همچنین مشخصه‌های مصالح خط لوله تغییر می‌کنند. در روشهای مورد استفاده در تحلیل حاضر، برای رابطه تنش ـ کرنش مربوط به مصالح لوله، از نمایش رامبرگ ـ اسگود و یا نمایش سه خطی رابطه تنش ـ کرنش استفاده شده است.

۲ـ۱ـ۳ـ سایر عوامل بطور فهرست‌وار عبارتند از:

الف ـ ابعاد مقطع لوله (قطر و ضخامت لوله)

ب ـ مشخصات حرکت گسل و هندسه تقاطع خط لوله و گسل

ـ جهت حرکت گسل و مقدار لغزش آن
ـ زاویه تقاطع گسل و خط لوله مدفون (زاویه گذر)
ـ زاویه شیب گسل (گسلهای عادی، معکوس و مایل)
ج ـ وجود مهارگاههای واقعی (ادواتی که توانایی ایجاد نقاط مهاری را دارا باشند) در طول خط لوله و در مجاورت ناحیه گسل
د ـ فشار داخلی لوله

۲ـ۲ ـ روشهای بررسی رفتار خطوط لوله

رفتار خطوط لوله مدفون به سه روش مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرضیات بکار گرفته شده در این روشها با یکدیگر متفاوت می‌باشند، که به ترتیب با واقع‌بینانه‌تر شدن فرضیات در نظر گرفته شده، جوابها دقیق‌تر و محدودیتهای روش کمتر می‌شود.

همه این تحلیلها بر پایه روش تکرار، استوار می‌باشند،به این ترتیب که با فرض مقداری برای یکی از مقادیر مجهول، با حل معادلات موجود، تغییر طول لوله مدفون تحت اثر نیروهای داخلی بدست آمده، تعیین می‌شود، و سپس این تغییر طول با تغییر طول لازم لوله با توجه به هندسه تقاطع خط لوله و گسل مقایسه می‌گردد. این عمل آنقدر تکرار می‌شود تا این دو مقدار به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک شوند، در این حالت تحلیل پایان می‌یابد و نیروهای داخلی خط لوله مدفون محاسبه می‌شوند.

۲ـ۲ـ۱ روش نیومارک ـ هال [مرجع ۱]

در این روش از مقاومت جانبی خاک در مقابل حرکت لوله و همچنین سختی خمشی خط لوله صرفنظر شده است و با فرض اینکه تغییر شکلهای ایجاد شده در لوله تنها از نوع محوری بوده و تنها عامل مقاوم، مؤلفه نگهدارنده محوری خاک می‌باشد، رفتار لوله تحلیل می‌شود (به این ترتیب شکل تغییر شکل یافته خط لوله به صورت یک خط راست مورب می‌باشد که نقاط مهاری مؤثر یا واقعی را در دو طرف صفحه گسل به یکدیگر متصل کرده است).

با توجه به صرفنظر کردن از فشار جانبی خاک، تنشهای بدست آمده از این روش دست پایین می‌باشند.

۲ـ۲ـ۲ـ روش کندی و همکاران [مرجع ۱]

در این روش مقاومت جانبی خاک، منظور شده، اما همچنان از سختی خمشی خط لوله صرفنظر گردیده است. در این حالت به کمک تئوری تغییر شکلهای بزرگ و فرض انحنای ثابت لوله تغییر شکل یافته در دو طرف صفحه گسل، رفتار لوله تحلیل می‌شود. نتایج این روش محافظه‌کارانه‌تر و دقیقتر می‌باشند.

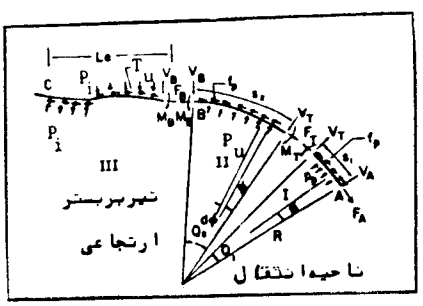
به علت آنکه در روشهای نیومارک ـ هال و کندی و همکاران از سختی خمشی لوله صرفنظر شده است، این روشها قادر به تحلیل رفتار لوله در حالت فشاری نمی‌باشند.

۲ـ۲ـ۳ روش ونگ ـ یه [مرجع ۴]

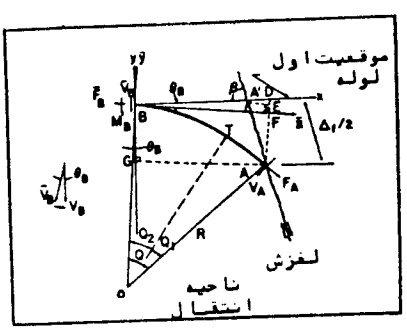
در این روش علاوه بر موارد در نظر گرفته شده در روش کندی و همکاران، سختی خمشی لوله نیز در نظر گرفته شده است، و وضعیت خط لوله در ناحیه دورتر از گسل به صورت تیر بر بستر الاستیک فرض شده است که شرایط مرزی این ناحیه با ناحیه گسل، در رفتار خط لوله تأثیر داده می‌شود(در ناحیه گسل، شعاع انحنای منحنی تغییر شکل یافته لوله، ثابت فرض شده و فشار خاک در حالت مفعولی به خط لوله اعمال شده است).با توجه به تأثیر سختی خمشی لوله و در نظر

گرفتن نیروی برشی در مقطع لوله، با این روش، رفتار خطوط لوله مدفون در حالت فشاری نیز قابل تعیین می‌باشد. این روش، یک معیار طراحی که اثر لنگر و نیروی محوری را بطور همزمان در نظر گرفته ارائه می‌دهد.

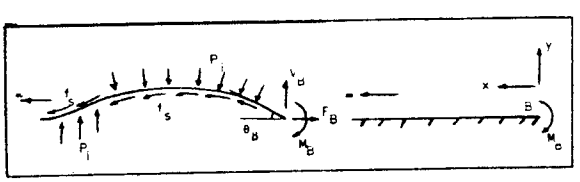
نتایج بدست آمده از روش ونگ ـ یه با توجه به معیار طراحی که ارائه داده است محافظه کارانه‌تر از روشهای قبلی می‌باشد. مدل تحلیلی روش ونگ ـ یه در شکل (۵) نشان داده



شکل ۵ الف ـ دیاگرام جسم آزاد خط لوله مدفون در گسل با لغزش جانبی



شکل ۵ ب ـ شکل هندسی خط لوله مدفون تحت اثر تغییر شکلهای بزرگ گسل با لغزش جانبی



شکل ۵ ج ـ دیاگرام جسم آزاد ناحیه تیر بر بستر الاستیک مربوط به خط لوله مدفون

شده است. توضیح اینکه این روش برای تحلیل رفتار خط لوله مدفون در ناحیه گسل با لغزش جانبی به کار میرود.

۳ـ رفتار خطوط لوله مدفون تحت اثر امواج ارتعاشی

رفتار خطوط لوله مدفون گاز در یک محیط مرتعش دارای ویژگیهای خاصی می‌باشد که در مورد سایر سازه‌ها مشاهده نمی‌شود، این ویژگیها از عوامل زیر ناشی می‌شوند:

الف) خطوط لوله، سازه‌های یک بعدی طویلی در جهت افقی می‌باشند. این طویل بودن باعث می‌شود، نقاط مختلف در طول آن تحت تأثیر حرکات مختلف زمین واقع شوند.

ب) جرم نسبی ناچیز خطوط لوله مدفون و احاطه شدن توسط محیطی با جرم بیشتر که این عامل سبب می‌شود، بر خلاف سازه‌های معمولی، اثر نیروی اینرسی در رفتار خطوط لوله مدفون بسیار ناچیز باشد.

ج) وجود خاک پیرامون خط لوله مدفون، باعث دخالت عوامل بزرگ سختی و مستهلک‌کننده در رفتار دینامیکی خط لوله مدفون می‌شود.

امواج ارتعاشی زلزله باعث ایجاد تغییر شکلهای نسبی در خاک پیرامون لوله می‌شوند. لوله مدفون تا حدودی از کرنشهای زمین پیروی کرده و در نتیجه در بدنه آن، هم کرنشهای طولی و هم انحناء (کرنشهای خمشی) بوجود می‌آید. لغزش و سر خوردن لوله در خاک پیرامون آن، می‌تواند باعث عدم پیروی کامل خط لوله از حرکت زمین و در نتیجه کاهش کرنشها و تنشهای ایجاد شده در بدنه لوله گردد. در مورد خطوط لوله مدفون، به علت طول زیاد آنها در جهت افقی، درنظرگرفتن تغییرات نسبی پارامترهای ارتعاش (مخصوصاً سرعت و تغییر مکان) در طول لوله از اهمیت زیادی برخوردار است، و در هر لحظه مقادیر این پارامترها

برای نقاط مختلف لوله متفاوت می‌باشد. تحلیل انجام شده بر اساس فرضیات زیر بنا شده است:

ـ سازه خط لوله مستقیم بوده و خصوصیات مقطع و عمق تدفین آن در طول خط لوله ثابت می‌باشند.

ـ از اثرات اتصالات جوش‌شده که در ساخت خطوط لوله گاز متداول می‌باشند صرفنظر می‌شود.

ـ خاک پیرامون خط لوله یکنواخت بوده و در طول خط لوله خصوصیات آن تغییر نمی‌کند.

ـ تغییر مکانها و بطور کلی خصوصیات سیستم و محیط ارتعاش در جهات جانبی و محوری خط لوله مدفون از یکدیگر مستقل بوده و بر یکدیگر تأثیری ندارند.

برای تعیین معادله حرکت سیستم، از مدل تحلیلی جرم متمرکز استفاده می‌شود **[مرجع ۳]** ، به این صورت که خط لوله در جهت طولی به قسمتهای مساوی تقسیم شده و جرم هر قسمت در مرکز آن در نظر گرفته می‌شود. شکل (۷) نشاندهنده مدل تحلیلی جرم متمرکز و درجات آزادی دینامیکی آن می‌باشد. با توجه به این مدل تحلیلی معادله حرکت سیستم در هر یک از جهات جانبی و محوری بصورت زیر ارائه می‌گردد (از استهلاک لوله در مقابل خاک صرفنظر شده است):

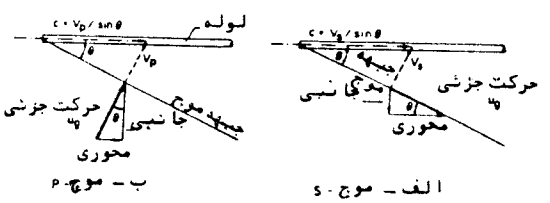
$$[M]\{\ddot{U}\}+[C_s]\{\dot{U}\}+[K_s+K_p]\{U\}=[C_s]\{\dot{U}_g\}+[K_s]\{U_g\}$$

که در این معادله:

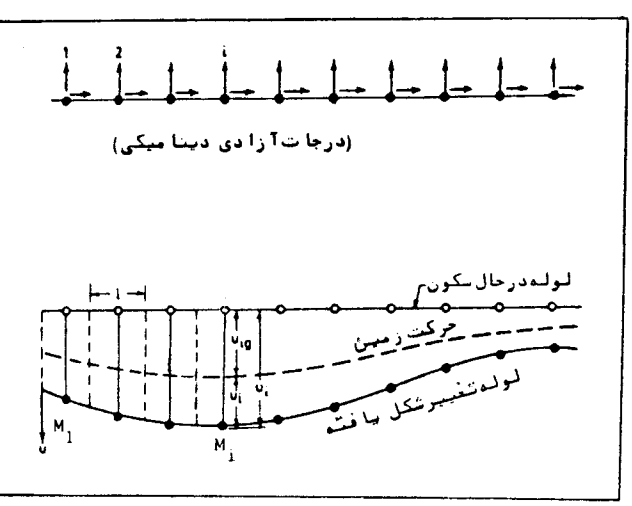
$[M]$= ماتریس قطری جرم لوله، $[C_s]$ = ماتریس استهلاک خاک، $[K_s]$, $[K_p]$ = ماتریسهای سختی خاک و لوله، $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{U\}$ = بردارهای مربوط به مقادیر مطلق شتاب، سرعت و تغییر مکان لوله، $\{\dot{U}_g\}$, $\{U_g\}$ = بردارهای مربوط به مقادیر نسبی سرعت و تغییر مکان لوله هستند.

سمت راست معادله اخیر که مبین نیروهای خارجی وارد بر لوله می‌باشد، با فرض اینکه حرکت لرزه‌ای زمین دارای یک تاریخچه زمانی واحد بوده و جبهه موج این حرکت نیز با سرعت ثابت و با زاویه مشخصی به خط لوله برخورد کند، تعیین می‌شود (شکل ۶).

ماتریسهای سختی و استهلاک خاک، با استفاده از تلفیق روش استاتیکی میندلین **[مرجع ۳]** و روش دینامیکی کرنش مسطح **[مرجع ۲]** تعیین می‌شوند. ماتریس سختی لوله نیز با توجه به درجات آزادی نشان داده شده در شکل (۷) بدست می‌آید. این ماتریس سختی در حالت ارتعاش جانبی سیستم، بصورت استاتیکی فشرده می‌شود **[مرجع ۳و۵]**.



شکل ۶ـ مؤلفه‌های ارتعاش سیستم تحت اثر: الف ـ امواج برشی ب ـ امواج طولی



شکل ۷ـ مدل تحلیلی جرم متمرکز لوله

با توجه به مدل تحلیلی جرم متمرکز، ماتریس جرم خط لوله در جهات جانبی و محوری یکسان بوده و قطری می‌باشد.

با حل معادلات حرکت سیستم خاک ـ لوله از روش ضمنی گام به گام θ ـ ویلسون، مقادیر مطلق تغییر مکان نقاط مختلف خط لوله تعیین می‌شوند. در نهایت با تعیین مقادیر مطلق تغییر مکان المانهای مختلف لوله در هر لحظه (گام زمانی Δt) مقادیر تنشهای ایجاد شده در دیواره لوله با توجه به ماتریس سختی آن محاسبه می‌گردند و تحلیل پایان می‌یابد.

۴ـ نتایج حاصل از تحلیل عددی

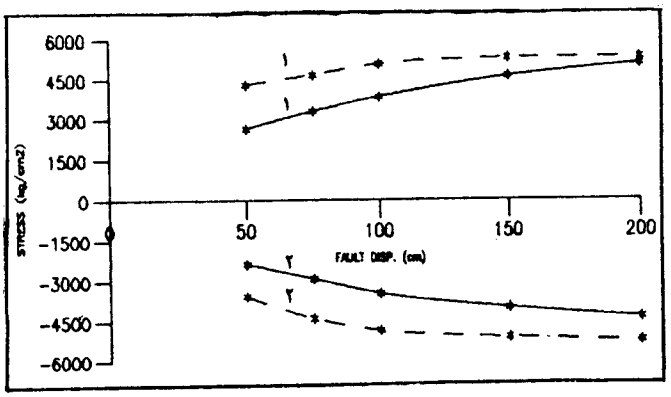
نتایج حاصل از تحلیل پارامترهای رفتار خط لوله مدفون تحت اثر پدیده گسلش و امواج ارتعاشی زلزله توسط برنامه کامپیوتری تهیه شده در چارچوب این پژوهش و با ملحوظ داشتن پدیده اندر کنش سازه و خاک در مجموعه معادلات حاکم رفتاری خطوط لوله مدفون به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

شایان ذکر است فرمولبندی معادلات فوق و حل آنها به همراه الگوریتم مربوط و همچنین نرم‌افزار تهیه شده در این پروژه با جزئیات کامل توسط مؤلفین در [مرجع ۱۲] ارائه شده است.

۴ـ۱ـ پدیده گسلش

۴ـ۱ـ۱ـ نوع و مشخصات خاک پیرامون خط لوله مدفون

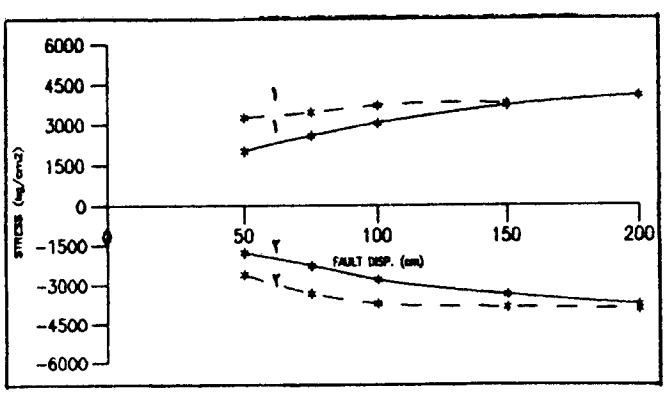
الف ـ مقادیر تنشهای محوری ایجاد شده در خطوط لوله مدفون در خاکهای چسبنده بزرگتر از مقادیر این تنشها در خطوط لوله مدفون در خاکهای دانه‌ای است. علت این امر بزرگتر بودن مؤلفهٔ محوری مقاومت خاکهای دانه‌ای می‌باشد (شکل ۸).



ـــــــ خاک دانه‌ای ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

•••••••• خاک چسبنده ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

شکل ۸ـ الف ـ تغییرات تنش محوری نقطه A نسبت به تغییر لغزش گسل جانبی (نقطه A در شکل ۵ نشان داده شده است).



ـــــــ خاک دانه‌ای ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

•••••••• خاک چسبنده ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

شکل ۸ـ ب ـ تغییرات تنش محوری نقطه B نسبت به تغییر لغزش گسل جانبی (نقطه B در شکل ۵ نشان داده شده است).

ب ـ مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در خطوط لوله مدفون در خاکهای دانه‌ای بزرگتر از مقادیر این نیروها در خطوط لوله مدفون در خاکهای چسبنده به علت بزرگتر بودن مؤلفه‌های جانبی مقاومت خاکهای دانه‌ای نسبت به خاکهای چسبنده می‌باشد (شکل ۹). منظور از لنگر

موجود لنگر ایجاد شده در مقطع لوله در اثر حرکت جانبی گسل می‌باشد.

ج ـ مقدار لنگر خمشی مقاوم مقطع خط لوله مدفون در خاکهای دانه‌ای بزرگتر از مقدار این لنگر در خطوط لوله مدفون در خاکهای چسبنده می‌باشد. منظور از لنگر مقاوم لنگری است که مقطع لوله می‌تواند با توجه به وجود نیروی محوری تحمل نماید.

د ـ در خاکهای دانه‌ای، افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چگالی خاک باعث افزایش مؤلفه‌های نگهدارنده خاک و در نتیجه بحرانی‌تر شدن وضعیت خط لوله مدفون می‌شود.

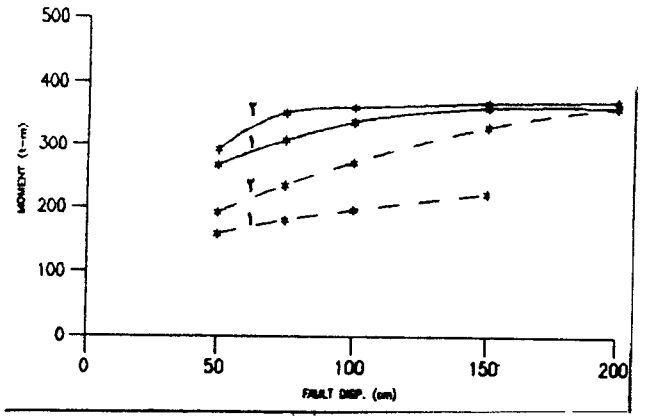
۴ـ۱ـ۲ـ قطر خط لوله مدفون

الف ـ قطر خط لوله مدفون، تأثیر چندانی بر مقادیر تنشهای محوری ایجاد شده در خط لوله مدفون ندارد (شکل ۱۰).

ب ـ افزایش قطر خط لوله مدفون، باعث افزایش شدید لنگر ایجاد شده و همچنین لنگر مقاوم مقطع خط لوله مدفون می‌شود، اما شدت افزایش لنگر مقاوم مقطع کمتر از شدت افزایش لنگر ایجاد شده در مقطع خط لوله مدفون می‌باشد (شکل ۱۱).

۴ـ۱ـ۳ـ عمق دفن شدگی خط لوله مدفون

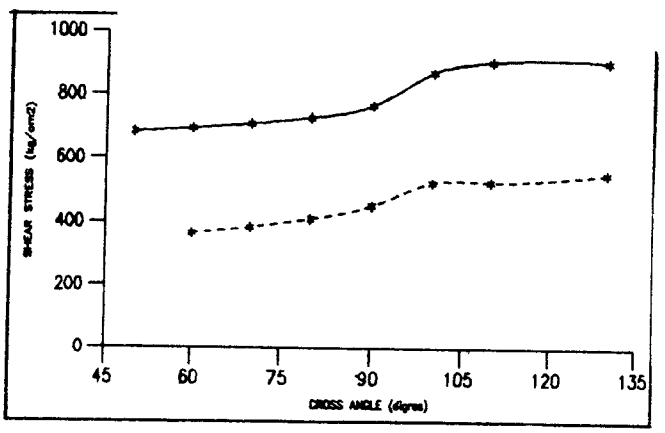
الف ـ افزایش عمق دفن شدگی خط لوله، باعث افزایش مؤلفه‌های نگهدارندهٔ خاکهای دانه‌ای شده که این امر موجب افزایش تنشهای محوری ایجاد شده در خطوط لوله مدفون می‌شود (شکل ۱۲).



ـــــــ خاک دانه‌ای ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

••••••• خاک چسبنده ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

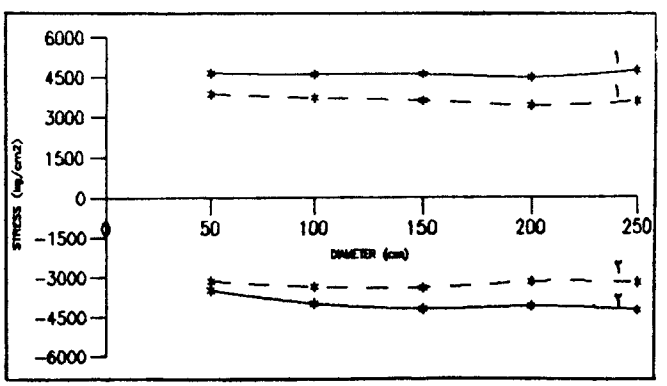
شکل ۹ـالف ـ تغییرات لنگر خمشی نسبت به تغییر لغزش گسل‌جانبی



ـــــــ خاک دانه‌ای

••••••• خاک چسبنده

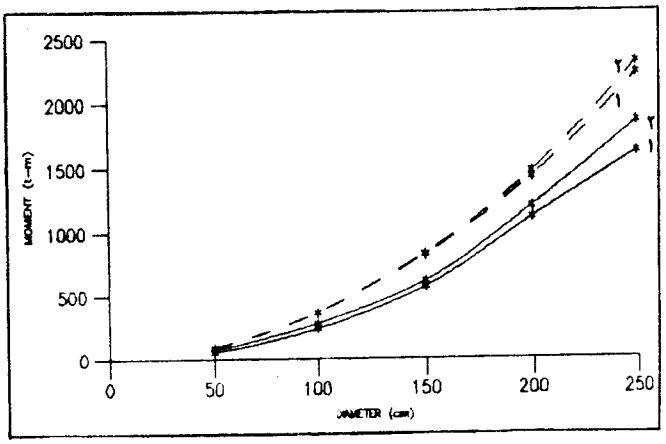
شکل ۹ـب ـ تغییرات تنش برشی نسبت به تغییر زاویه گذر لوله در گسل جانبی



ـــــــ تنش محوری در نقطه A ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

••••••• تنش محوری در نقطه B ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

شکل ۱۰ـ تغییرات تنش محوری نسبت به تغییر قطر لوله در گسل جانبی



ـــــــ لنگر مقاوم ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

••••••• لنگر موجود ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

شکل ۱۱ـ تغییرات لنگر خمشی نسبت به تغییر قطر لوله در گسل جانبی

ب ـ افزایش عمق تدفین خط لوله، باعث افزایش لنگر ایجاد شده و کاهش لنگر مقاوم مقطع خطوط لوله مدفون می‌شود (شکل ۱۳).

۴ـ۱ـ۴ـ زاویه اصطکاک بین خاک و بدنه لوله

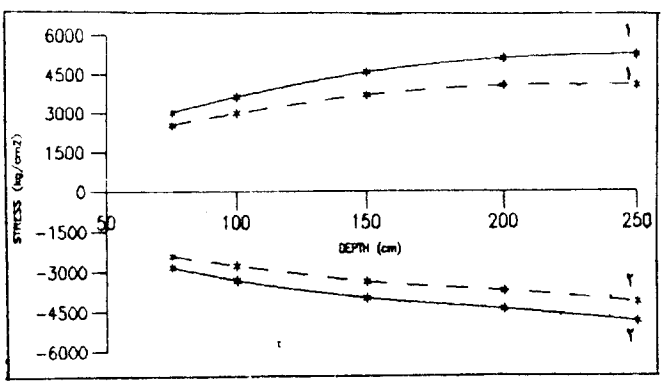
الف ـ در خاکهای دانه‌ای افزایش زاویه اصطکاک بین خاک و بدنه لوله به شدت مقادیر تنشهای محوری را به علت افزایش مؤلفه محوری نگهدارنده خاک افزایش می‌دهد (شکل ۱۴).

ب ـ افزایش زاویه اصطکاک بین خاک و بدنه لوله بر مقادیر لنگر خمشی و تنش برشی ایجاد شده در خط لوله مدفون تقریباً بی‌تأثیر بوده و به مقدار بسیار جزئی باعث افزایش این مقادیر می‌شود (شکل ۱۵).

ج ـ افزایش زاویه اصطکاک بین خاک و بدنه لوله، مقادیر لنگر مقاوم مقطع را بشدت کاهش می‌دهد. علت این امر افزایش نیروهای محوری می‌باشد که منجر به کاهش لنگر مقاوم مقطع می‌شود (شکل ۱۵).

۴ـ۱ـ۵ ـ ضخامت دیواره خط لوله مدفون

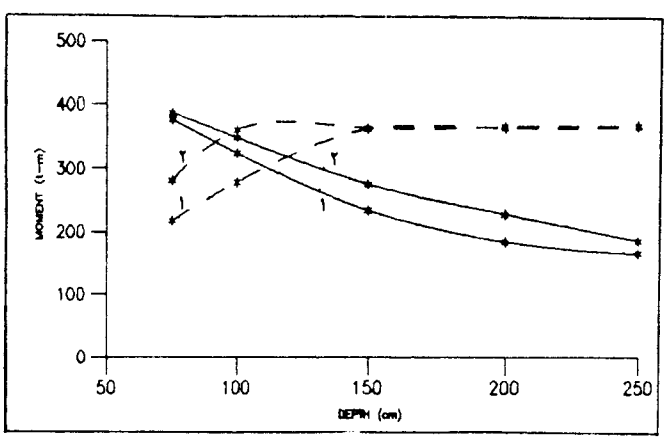
افزایش ضخامت باعث کاهش شدید مقادیر تنشهای محوری، برشی و لنگر خمشی ایجادشده در مقطع خطوط لوله مدفون شده و مقدار لنگر مقاوم مقطع خط لوله را افزایش می‌دهد (به علت افزایش سطح مقطع و ممان اینرسی مقطع خط لوله مدفون).



ـــــــ تنش محوری در نقطه A ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

••••••• تنش محوری در نقطه B ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

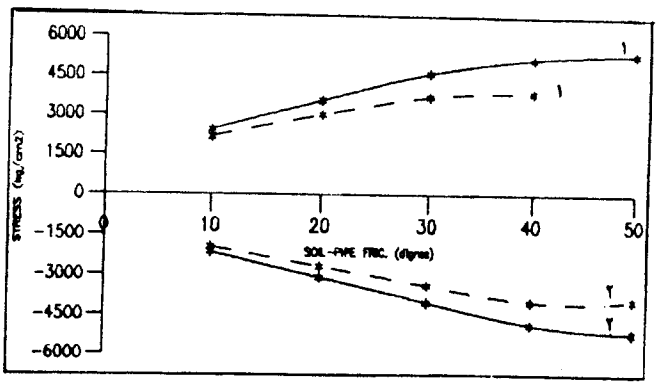
شکل ۱۲ـ تغییرات تنش محوری نسبت به تغییر عمق لوله در گسل جانبی



ـــــــ لنگر مقاوم ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

••••••• لنگر موجود ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

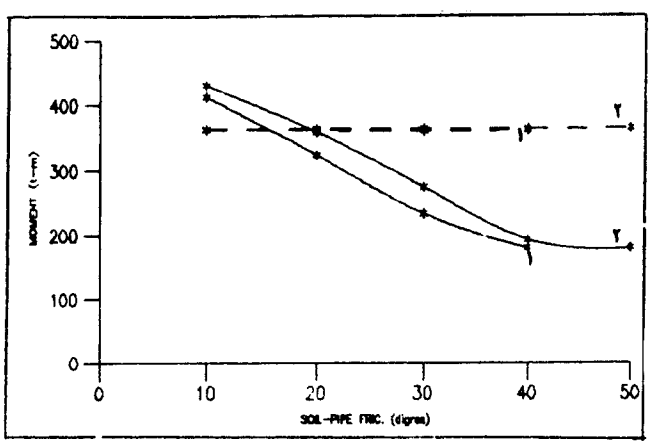
شکل ۱۳ـ تغییرات لنگر خمشی نسبت به تغییر عمق لوله در گسل جانبی



ـــــــ تنش محوری در نقطه A ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

..... تنش محوری در نقطه B ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

شکل ۱۴ـ تغییرات تنش محوری نسبت به تغییر زاویه اصطکاک خاک دانه‌ای و بدنه لوله در گسل جانبی



ـــــــ لنگر مقاوم ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

..... لنگر موجود ۱ـ $\beta = ۷۰^\circ$، ۲ـ $\beta = ۱۱۰^\circ$

شکل ۱۵ـ تغییرات لنگر خمشی نسبت به تغییر زاویه اصطکاک خاک دانه‌ای و بدنه لوله در گسل جانبی

۴ـ۱ـ۶ـزاویه تقاطع گسل جانبی و خط لوله مدفون

الف ـ افزایش زاویه گذر خط لوله تا حدود زوایای ۹۰ تا ۹۵ درجه باعث کاهش تنشهای محوری ایجادشده در خطوط لوله مدفون می‌شود. در زوایای گذر بین صفر تا حدود ۹۰ درجه تنشهای محوری ایجاد شده در خط لوله کششی می‌باشند.

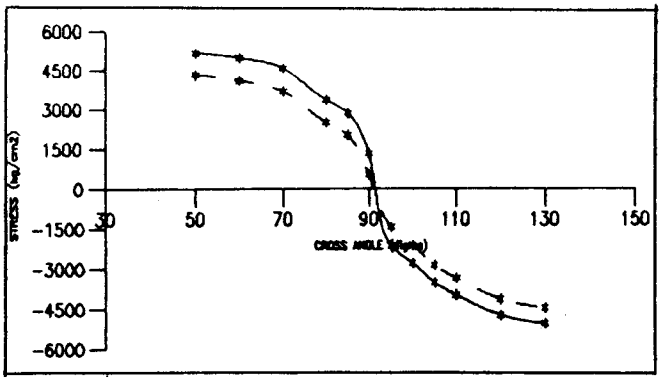
ب ـ در زوایای گذر بزرگتر از حدود ۹۰ تا ۹۵ درجه خط لوله تحت فشار قرار می‌گیرد. در این دامنه با افزایش زاویه گذر خط لوله مدفون، بر مقادیر تنشهای محوری فشاری افزوده می‌گردد (شکل ۱۶).

ج ـ افزایش زاویه گذر تا حدود زوایای ۹۰ تا ۹۵ درجه باعث افزایش لنگر خمشی می‌شود و بعد از آن، با افزایش بیشتر زاویه گذر، مقادیر لنگر خمشی کمی افزایش می‌یابند، اما بر مقدار تنش برشی به شدت افزوده می‌گردد (شکل ۱۷).

د ـ افزایش زاویه گذر تا حدود زوایای ۹۰، باعث افزایش شدید لنگر مقاوم مقطع خط لوله مدفون می‌شود و با افزایش بیشتر زاویه گذر، از مقادیر لنگر خمشی مقاوم به شدت کاسته میشود (شکل ۱۷).

۴ـ۱ـ۷ـزاویه تقاطع (گذر) گسل عادی و خط لوله مدفون

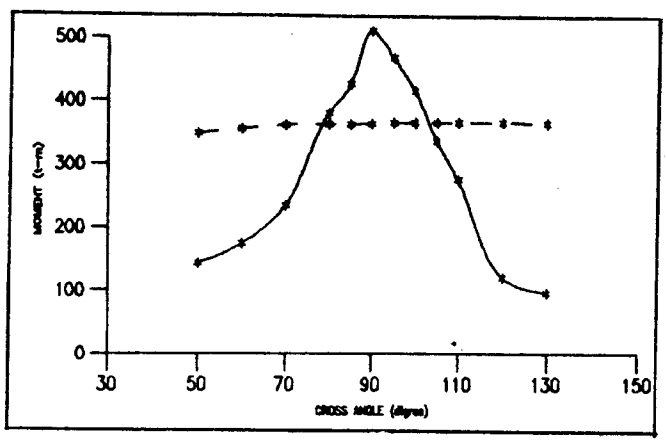
افزایش زاویه گذر خط لوله باعث افزایش مقادیر تنشها می‌شود و وضعیت خط لوله مدفون با افزایش زاویه تقاطع خط لوله و گسل بحرانی‌تر می‌شود. این افزایش تنش تا زوایای حدود ۵۰ درجه شدیدتر بوده و بعد از آن با بزرگتر شدن زاویه گذر، از شدت این افزایش تنش کاسته می‌شود. توضیح اینکه گسلهای با لغزش عادی همواره خطوط لوله را تحت کشش قرار می‌دهند.



_____ تنش محوری در نقطه A

••••••• تنش محوری در نقطه B

شکل ۱۶ـ تغییرات تنش محوری نسبت به تغییر زاویه گذر لوله در گسل جانبی



_____ لنگر مقاوم

••••••• لنگر موجود

شکل ۱۷ـ تغییرات لنگر خمشی نسبت به تغییر زاویه گذر لوله در گسل جانبی

۴ـ۱ـ۸ـزاویه تقاطع (گذر) گسل معکوس و خط لوله مدفون

گسلهای معکوس همواره باعث ایجاد فشار در خطوط لوله مدفون می‌شوند که بسیار نامطلوب است در این حالت نیز اثر زاویه گذر مانند حالت گسل عادی می‌باشد.

۴ـ۱ـ۹ـزاویه شیب گسل عادی

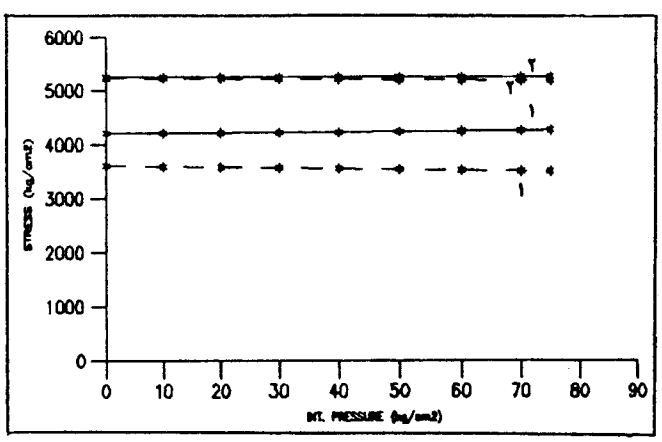
با افزایش زاویه شیب در گسلهای عادی (شکل ۲)، مقادیر تنشهای ایجاد شده در مقطع لوله کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان پیش‌بینی نمود، هر چه زاویه شیب گسل عادی بزرگتر باشد، امکان گسیختگی خط لوله مدفون در اثر لغزش این نوع گسلها کاهش می‌یابد.

۴ـ۱ـ۱۰ـوجود مهارگاههای واقعی در ناحیه گسل

وجود مهارگاههای واقعی در طرفین گسل و در داخل فاصله مهاری مؤثر مانند زانویی، سه‌راهی و سایر ادوات، مقادیر تنشها را افزایش می‌دهد. هر چه این مهارگاهها به صفحه گسل نزدیکتر باشند مقدار تنشها با شدت بیشتری افزایش می‌یابد (شکل ۱۹).

۴ـ۱ـ۱۱ـفشار داخلی لوله

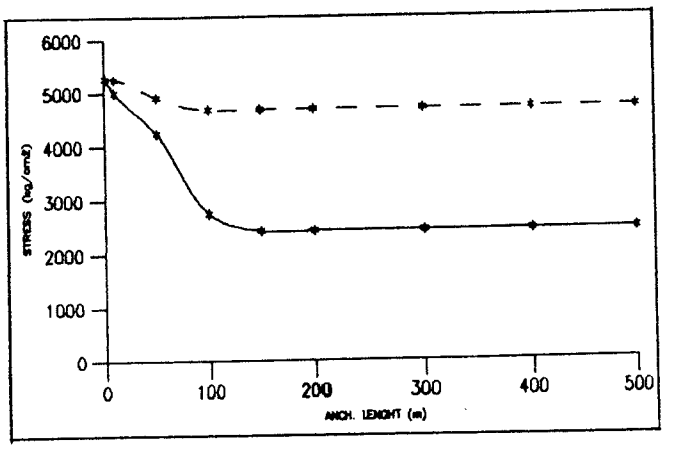
فشار داخلی لوله تأثیر چندانی در مقادیر تنشهای ناشی از لغزش گسل ندارد. اما به مقدار جزئی (بسیار ناچیز) از مقادیر این تنشها می‌کاهد. این کاهش، از آنجا ناشی می‌شود که فشار داخلی باعث کاهش انحنای خط لوله مدفون در طرفین گسل می‌شود (شکل ۱۸).



_____ گسل جانبی ۱ـ خاک دانه‌ای، ۲ـ خاک چسبنده

---- گسل عادی ۱ـ خاک دانه‌ای، ۲ـ خاک چسبنده

شکل ۱۸ـ تغییرات تنش نسبت به تغییر فشار داخلی لوله



——— خاک دانه‌ای
- - - - خاک چسبنده

شکل ۱۹ـ تغییرات تنش نسبت به تغییر طول مهاری واقعی در گسل جانبی

۴ـ۲ـ امواج ارتعاشی زلزله

۴ـ۲ـ۱ـ نوع خاک پیرامون خط لوله مدفون

افزایش سرعت موج برشی در خاکهای پیرامون لوله، به شدت از مقادیر تنشهای محوری و خمشی خط لوله مدفون می‌کاهد. بنابراین در خاکهای سخت‌تر، وضعیت لوله مدفون تحت اثر امواج ارتعاشی زلزله بسیار مطلوبتر بوده و تنشهای ایجاد شده در دیواره آن، بسیار کمتر از حالتیست که خط لوله در خاک نرم مدفون باشد. علت این امر کاهش اختلاف فاز تغییر مکان نقاط مختلف خط لوله در اثر افزایش سرعت پیشروی جبهه موج در طول آن می‌باشد.

۴ـ۲ـ۲ـ عمق دفن‌شدگی خط لوله مدفون

افزایش عمق تدفین لوله باعث افزایش تنشهای محوری و خمشی ایجاد شده در مقطع لوله مدفون می‌شوند. تنشهای محوری بیشتر تحت تأثیر تغییرات عمق تدفین خط لوله واقع می‌شوند. اما در نسبتهای عمق به قطر بیشتر از ۱۵،مقادیر تنشها مستقل از عمق تدفین خط لوله مدفون می‌باشند (شکل ۲۰).

۴ـ۲ـ۳ـ قطر خط لوله مدفون

افزایش قطر لوله، باعث کاهش تنشهای محوری و افزایش تنشهای خمشی می‌شود. با توجه به آنکه مقادیر تنشهای محوری بسیار بیشتر می‌باشند و طرح را کنترل می‌نمایند، انتظار میرود که لوله‌های به قطر کمتر بیشتر در معرض آسیب‌دیدگی قرار گیرند (شکل ۲۲).

۴ـ۲ـ۴ـ ضخامت دیواره خط لوله مدفون

افزایش ضخامت لوله، تنشهای ایجاد شده در خط لوله را تحت اثر عبور امواج زلزله کاهش می‌هد. این کاهش در مورد تنشهای محوری بسیار چشمگیرتر از کاهش مقادیر تنشهای خمشی می‌باشد (شکل ۲۳).

۴ـ۲ـ۵ـ طول خط لوله مدفون

در لوله‌های طویل، تنشها از طول خط لوله مستقل می‌باشند، اما در لوله‌های کوتاه، مقادیر تنشها با افزایش طول خط لوله افزایش می‌یابند. تغییرات طول خط لوله، بیشتر تنشهای محوری را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد و بر مقادیر تنشهای خمشی تأثیر قابل توجهی ندارد.

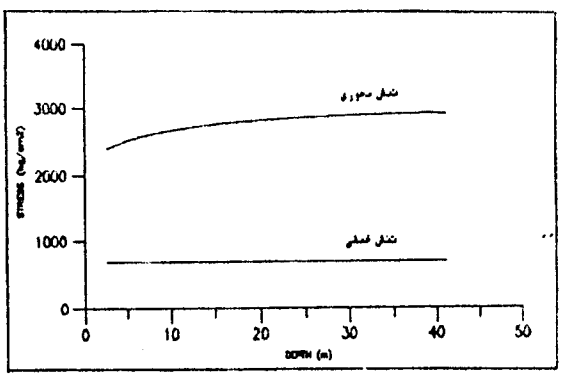
نتایج تحلیل نشان می‌دهد، تنشهای محوری و خمشی به ترتیب در نسبتهای طول به قطر بزرگتر از ۱۵۰ و ۱۰۰ از طول خط لوله مستقل می‌باشند (شکل ۲۱).

۴ـ۲ـ۶ـ شرایط انتهایی خط لوله مدفون

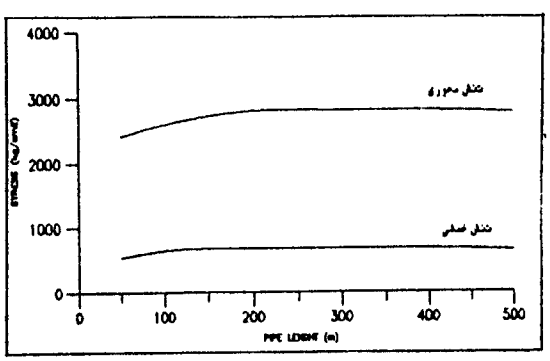
شرایط انتهایی خط لوله با توجه به طول خط لوله مدفون، تأثیر چندانی بر تنشهای ایجاد شده در مقاطع میانی خط لوله ندارند، اما تنشهای انتهایی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. تأثیر شرایط انتهایی بر تنشهای محوری، بیشتر از

تأثیر آن بر مقادیر تنشهای خمشی می‌باشد.

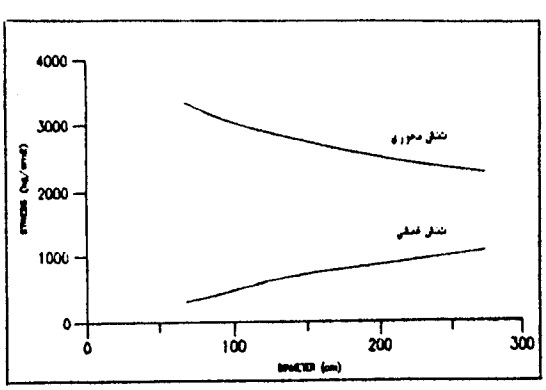
با توجه به نتایج حاصل از تحلیل مشخص می‌شود، که احتمال گسیختگی خطوط لوله مدفون در محل اتصال آنها به سایر تأسیسات که می‌تواند تا حدودی باعث گیرداری انتهای خط لوله شود، بسیار بیشتر از مقاطع میانی خط لوله مدفون می‌باشد (شکل ۲۴).



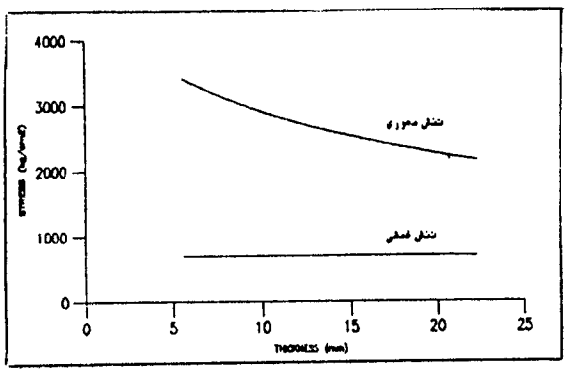
شکل ۲۰ـ تغییرات تنشهای محوری و خمشی نسبت به تغییر عمق تدفین



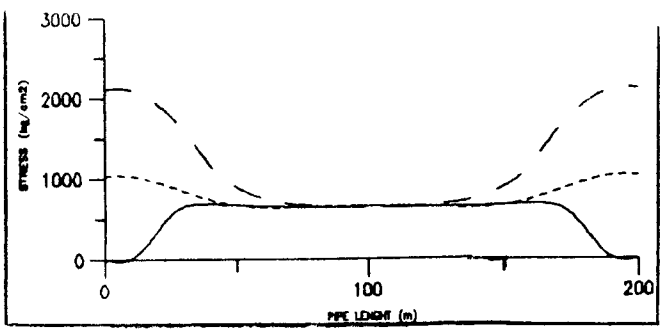
شکل ۲۱ـ تغییرات تنشهای محوری و خمشی نسبت به تغییر طول لوله



شکل ۲۲ـ تغییرات تنشهای محوری و خمشی نسبت به تغییر قطر لوله



شکل ۲۳ـ تغییرات تنشهای محوری و خمشی نسبت به تغییر ضخامت دیواره لوله

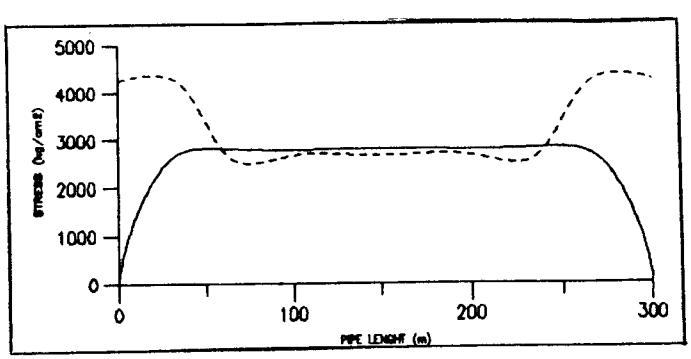


----گیردار

- - - - غلتکی ممانگیر

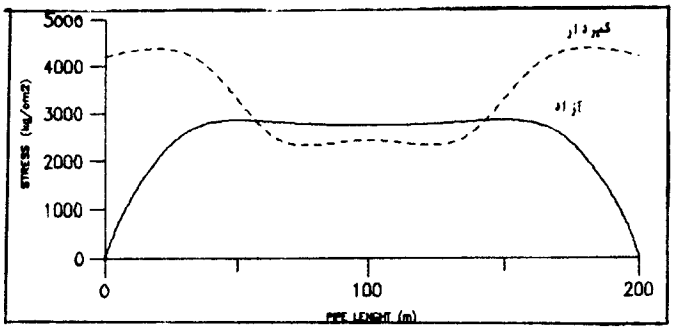
——آزاد

شکل ۲۴ الف ـ تغییرات مقادیر حداکثر تنشهای خمشی در طول خط لوله با شرایط انتهایی متفاوت



----گیردار ——آزاد

شکل ۲۴ ب ـ تغییرات مقادیر حداکثر تنشهای محوری در طول خط لوله با شرایط انتهایی متفاوت



شکل ۲۴ ج ـ تغییرات مقادیر حداکثر تنشهای محوری در طول خط لوله با شرایط انتهایی متفاوت

۴ـ۲ـ۷ـ تغییر خصوصیات خاک پیرامون خط لوله مدفون

تغییر خصوصیات خاک در طول خط لوله، به شدت موجب افزایش تنشها در محل تغییر وضعیت خاک شده و می‌تواند موجب گسیختگی خط لوله در این محل شود. تغییر جنس خاک به علت تغییر ناگهانی سرعت موج در طول خط لوله و انعکاس و تفرق امواج زلزله در این محل، مقادیر تنشها را تا چندین برابر افزایش می‌دهد.

۵ـ توصیه‌ها و نکات طراحی

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل رفتار خطوط لوله مدفون در ناحیه گسل و تحت اثر امواج ارتعاشی توصیه‌های زیر ارائه می‌گردد:

۵ـ۱ـ پدیده گسلش

الف ـ در ناحیه گسل، پیرامون لوله (به ضخامت حداقل دو تا سه برابر قطر لوله) بایستی بوسیله خاک دانه‌ای (ماسه‌ای) نرم و سبک با زاویه اصطکاک داخلی حداقل، کاملاً پر شود. ماسه ریخته شده بایستی عاری از قطعات درشت و قلوه‌سنگ باشد. طول ناحیه‌ای که بایستی موارد فوق درآن رعایت شود، از مجموع طول مهاری مؤثر (که از نتایج تحلیل تعیین شده) و طول منطقه گسل در هر طرف، بدست می‌آید.

ب ـ در ناحیه گسل، حتی‌الامکان از لوله‌های با قطر کوچکتر استفاده شده و سعی شود به جای یک خط لوله قطور از دو یا چند لوله کم‌قطر استفاده شود. این امر علاوه بر آنکه باعث طرح ایمن‌تر می‌شود، در صورت آسیب‌دیدن یکی از لوله‌ها، از قطع شدن کامل جریان گاز جلوگیری می‌کند.

ج ـ در ناحیه گسل، تا حد امکان خط لوله مدفون به سطح زمین نزدیکتر شده و از ارتفاع خاک روی آن کاسته شود.

د ـ در ناحیه گسل، با استفاده از پوششهای صیقلی و سخت و مقاوم در مقابل خوردگی بر روی بدنه خط لوله مدفون، از اصطکاک بین خاک و بدنه لوله کاسته شود.

هـ ـ در ناحیه گسل، با استفاده از خطوط لوله با مصالح با مقاومت بالا و انعطاف‌پذیر وضعیت خط لوله مدفون در مقابل لغزش گسل، بهبود یابد. در این ناحیه بایستی در کیفیت اتصالات جوش‌شده که در ساخت خطوط لوله گاز، مرسوم می‌باشند، دقت کافی بعمل آید، تا از ایجاد تمرکز تنش و تحت‌الشعاع قرار گرفتن نتایج تحلیل که بدون در نظر گرفتن اثر اتصالات حاصل شده‌اند، اجتناب شود.

و ـ در ناحیه گسل، از خطوط لوله با ضخامت بیشتر استفاده شود. بدیهی است بایستی در محل اتصال مقاطع با ضخامتهای متفاوت به یکدیگر با رعایت موارد لازم برای جلوگیری از تمرکز تنش، ایمنی خط لوله مدفون تأمین شود.

ز ـ با توجه به جهت لغزش گسل جانبی، زاویه گذر تا حد امکان نزدیک به ۹۰ درجه انتخاب شود. با عبور خطوط لوله مدفون با زوایای بین ۸۵ تا ۹۰ درجه علاوه بر آنکه از ایجاد فشار در خط لوله اجتناب می‌شود، مقادیر تنشهای محوری و لنگر خمشی و مقاوم در دامنه بسیار مطلوبی واقع می‌شوند.

ح ـ زاویه عبور خطوط لوله مدفون از گسلهای عادی حتی‌الامکان کوچک و در حدود ۵ تا ۱۰ درجه انتخاب شود. (با توجه به بند ۴ـ۱ـ۷).

ط ـ خطوط لوله، در تقاطع با گسلهای معکوس، روی سطح زمین و بر روی تکیه گاههای لغزنده واقع شوند و زاویه عبور خط لوله نیز تا حد امکان کوچک و در حدود ۵ تا ۱۰ درجه انتخاب شود.

ی ـ در ناحیه گسل، از قراردادن ادواتی که توانایی ایجاد مهارگاه را دارند در طول خط لوله جداً اجتناب شود.

۵ـ۲ـاثر امواج ارتعاشی

الف ـ برای کاهش اثر مخرب امواج ارتعاشی زلزله، بایستی تا حد امکان عمق تدفین خط لوله کاهش یابد.

ب ـ برای کاهش اثر مخرب امواج ارتعاشی زلزله، بایستی تا حد امکان از لوله‌های با قطر بزرگتر استفاده شود. البته این توصیه در نواحی دور از محل گسل معتبر بوده و برای ناحیه گسل با توجه به بند ۵ـ۱ـب باید از لوله‌های با قطر کوچکتر استفاده شود.

ج ـ با استفاده از لوله‌های با ضخامت بزرگتر، خطر ناشی از اثر امواج ارتعاشی زلزله کاهش می‌یابد.

د ـ در محل اتصال خطوط لوله با سایر تأسیسات تمهیدات لازم در جهت انعطاف‌پذیری بیشتر اتصال به کار برده شود.

هـ در تحلیل رفتار خط لوله مدفون تحت اثر امواج ارتعاشی، می‌توان به جای کل طول خط لوله که ممکن است به صدها کیلومتر هم برسد، تنها طول معینی از خط لوله را (با توجه به قطر آن) مورد تحلیل قرار داد.

فهرست منابع

1- Guidelines for the seismic Design of Oil and Gas Pipeline systems, ASCE (1984).

2- M.NOVAK, T.NOGAMI and F.A.ELLA, "Dynamic Soil Reaction for plane strain Case", J.Eng. Mech. Div. ASCE, 104, 953-959 (1978).

3- A.HINDY and M.NOVAK, "Earthquake Response of Underground Pipilines", Earthqu. Eng. Struct. Dyn.,7, 451-476 (1979)

4- R.L.WANG and Y.H.YEH, "A Refined Seismic Analysis and Design of Buried Pipeline for Fault Movement", Earthqu, Eng. Struct. Dyn., 13,75-96 (1985).

5- R.W.CLOUGH and J.PENZIEN" Dynamics of structures", McGRAW - HILL, 1975.

6- K.J. BATHE, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Printic - Hall , INC. (1982).

7- Earthquake Behaviour and safety of Oil and Gas storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-Vol 77, ASME (1983).

8- The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, ASCE (1977)

9- A.P.MOSER, "Buried Pipe Design",(1990).

۱۰ـ خسرو برگی، «مهندسی زلزله و تحلیل سازه‌ها در برابر زلزله» انتشارات دفتر تحقیقات و معیارهای فنی سازمان برنامه و بودجه ـ ۱۳۶۹

۱۱ـ خسرو برگی، «دینامیک سازه‌ها»، انتشارات دانشگاه تهران ـ چاپ دوم ۱۳۷۰

۱۲ـ خسرو برگی، غلامرضا هروی، «تدوین ضوابط و معیارهای طراحی ایمن خطوط لوله گاز برابر زلزله و تهیه نرم‌افزارهای مربوط»، طرح پژوهشی مصوب دانشگاه تهران ـ ۱۳۷۲.

۱۳ـ خسرو برگی ـ «اصول مهندسی زلزله»، انتشارات جهاد دانشگاهی ـ ۱۳۷۳.